

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.com

П. С. КУДРЯВЦЕВ

ИСТОРИЯ ФИЗИКИ



УДК 53.01:666

П. С. КУДРЯВЦЕВ

ИСТОРИЯ ФИЗИКИ

ТОМ



ОТ МЕНДЕЛЕЕВА
ДО ОТКРЫТИЯ КВАНТ
(1870-1900 гг.)

ГОСУДАРСТВЕННОЕ
УЧЕБНО-ПЕДАГОГИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МИНИСТЕРСТВА ПРОСВЕЩЕНИЯ РСФСР
МОСКВА • 1956

ПРЕДИСЛОВИЕ

Этим томом заканчивается история доквантовой физики. В течение последнего тридцатилетия XIX в. в развитии физики происходили глубокие процессы, приведшие в конечном счёте к возникновению в ней новых идей и понятий. К таким понятиям относятся прежде всего понятия электромагнитного поля и структуры атома.

Электромагнитное поле и структура атома — принципиально новые области физического исследования, о существовании которых физики до Максвелла и не подозревали. Максвелловская электродинамика явилась тем источником, из которого возникли и развились новые направления физического исследования, и это обстоятельство заставило автора уделить ей особое внимание.

Наряду с этими важнейшими событиями внутренней истории физики в рассматриваемый период происходили крупнейшие изменения в её внешней истории, в её взаимосвязях с жизнью общества. Роль физики в развитии общественного производства неуклонно повышалась, что нашло своё выражение в количественном росте физических исследований, в росте научных кадров, в организации физических институтов, лабораторий, конгрессов и съездов.

В книге уделено достаточное внимание и этим важнейшим процессам, приведшим в наши дни к таким явлениям, как «атомная политика». В связи с этим нельзя было не коснуться вопроса о научном соревновании наций в эпоху начавшегося упадка капитализма. В книге отдельная глава посвящена характеристике русской физики в конце XIX в., причём рассматривается влияние общественных условий на развитие науки в России.

Итак, в книге рассматривается процесс завершения классической физики и одновременного вызревания в ней новых революционных открытий с их огромными научными, философскими и общественными последствиями. Автор стремился отразить этот сложный процесс так, как он происходил в действительности, прибегая в решении этой задачи к многочисленным «свидетельским показаниям». Сознавая, что в этом сложном и трудном деле неизбежны промахи и ошибки, автор будет благодарен читателям и критикам, которые укажут на недочёты предлагаемой книги.

Автор выражает глубокую благодарность рецензенту профессору МГУ имени Ломоносова Б. В. Ильину за ценные замечания. Рукопись была прочитана также ныне покойным профессором МГУ А. К. Тимирязевым (1880—1955). А. К. Тимирязев был редактором первого тома этой книги. Он проявлял исключительное внимание и интерес к работе автора над вторым томом. Автор пользуется случаем, чтобы здесь отдать долг благодарности и памяти своему дорогому учителю.

РАЗВИТИЕ ТЕХНИКИ В ПЕРИОД ПЕРЕХОДА
К МОНОПОЛИСТИЧЕСКОМУ КАПИТАЛИЗМУ

(1870—1900)

Общие
замечания.

Громадный рост производительных сил в результате интенсивного технического прогресса, ведущий в конечном счёте к конфликту производительных сил со

сложившимися при капитализме производственными отношениями, является важнейшим фактом истории конца XIX — начала XX в.

Ещё в 1848 г. Маркс и Энгельс писали в «Коммунистическом манифесте»: «Буржуазия менее чем за сто лет своего классового господства создала более многочисленные и более грандиозные производительные силы, чем все предшествовавшие поколения, вместе взятые. Покорение сил природы, машинное производство, применение химии в промышленности и земледелии, пароходство, железные дороги, электрический телеграф, освоение для земледелия целых частей света, приспособление рек для судоходства, целые, словно вызванные из-под земли, массы населения, — какое из прежних поколений могло подозревать, что такие производительные силы дремлют в недрах общественного труда!»¹

Рост производительных сил стал ещё более стремительным в рассматриваемый нами период. Сама логика капиталистического производства неумолимо вела к повышению органического состава капитала, и если промышленный переворот, вызвавший само возникновение промышленного капитала, начался в сфере лёгкой промышленности, то теперь ведущая роль перешла к производству средств производства, к тяжёлой промышленности. Металлургия и горное дело, станкостроение и машиностроение, химия и транспорт, связь и энергетика переживают подлинную техническую революцию.

О происшедших сдвигах в области тяжёлой промышленности можно судить по следующим цифрам. Производство стали с 0,5 млн. *т* в 1870 г. возросло к 1900 г. до 28 млн. *т*, т. е. в 56 раз, при общем увеличении мировой промышленной продукции за тот же период в три раза. Выплавка чугуна увеличилась с 12,2 млн. *т* в 1870 г. до 40,7 млн. *т* в 1900 г. Добыча каменного угля возросла с 218 млн. *т* в 1870 г. до 769 млн. *т* в 1900 г., нефти с 0,8 млн. *т* до 20 млн. *т*. Быстрыми темпами шло развитие железнодорожного транспорта, что особенно наглядно характеризует процесс экономического развития: «Желдороги, — писал В. И. Ленин, — это — итоги самых главных отраслей капиталистической промышленности, каменноугольной и железнорудной, итоги — и наиболее наглядные показатели

¹ К. Маркс, Ф. Энгельс, Манифест Коммунистической партии, Госполитиздат, 1953, стр. 37.

развития мировой торговли и буржуазно-демократической цивилизации»¹. Вот как выглядели эти итоги к концу XIX в.:

Рост протяжения железных дорог с 1840 по 1900 (в км)

Страны	Годы		
	1840	1870	1900
Европ. Россия . .	26	11 243	48 107
Германия	46,9	19 575	51 391
Великобритания . .	1 349	24 999	35 186
Австро-Венгрия . .	475	9 589	36 883
Франция	427	17 931	42 827
США	5 344	85 139	311 049

Общая протяжённость железных дорог во всём мире составляла в 1870 г. свыше 200 тыс. км, а к 1900 г. составила 790 тыс. км.

Наряду с количественными резко изменились и качественные показатели: двигатели, станки стали более мощными и производительными, повысились скорости и мощности судов и паровозов, появились новые типы двигателей: турбины, двигатели внутреннего сгорания, электромоторы. Широкое распространение получила в конце века электрическая энергия.

Металлургия и машиностроение. Очевидно, что прогресс техники в области производства средств производства, энергетики и транспорта был бы невозможен без прогресса в области производства железа и стали. Как известно, железо добывается из руд, в которых оно содержится в виде своих окислов: окиси железа Fe_2O_3 и закиси FeO . Стало быть, технологический процесс извлечения железа из руд сводится к химическому процессу восстановления железа из его окислов, удалению простой породы и очистки металла от вредных примесей. Но химически чистое железо так же непригодно для технической практики, как дистиллированная вода для питья. Техническое железо должно содержать хотя и в незначительном количестве примеси, в первую очередь углерод. Если углерода содержится до 0,2%, то железо мягкое, легко поддаётся ковке и называется ковочным железом. Такое железо идёт на изготовление подков. С повышением содержания углерода до 0,5% железо становится зернистым, ковкость и способность сваривания уменьшаются, прочность на разрыв увеличивается; с дальнейшим повышением содержания углерода металл получает способность приобретать закалку, увеличивается плавкость. При увеличении углерода до 3,5—5% металл легко плавится, становится зернистым и твёрдым (чугун).

Восстановление и науглероживание железа в средние века достигалось так называемым сыродутным способом. В сыродутных печах куски железной руды, подвергаясь действию жара, давали тестообразную массу — крицу, которая обрабатывалась ковкой. Применение водяных колёс для приведения в действие воздушных мехов дало возможность перейти к выплавке чугуна из руды (доменный процесс). Доменные печи, в которых осуществляется процесс восстановления железа, насыщения его углеродом и расплавление продукта, в течение XVIII—XIX столетий значительно

¹ В. И. Ленин, Соч., т. 22, стр. 178.

эволюционировали в сторону увеличения их производительности. Если в начале XIX столетия производительность доменных печей составляла не свыше 5 *t* в сутки, к середине десятилетия она возросла в 10 раз, а к концу XIX столетия большие печи давали производительность до 340 *t* в сутки.

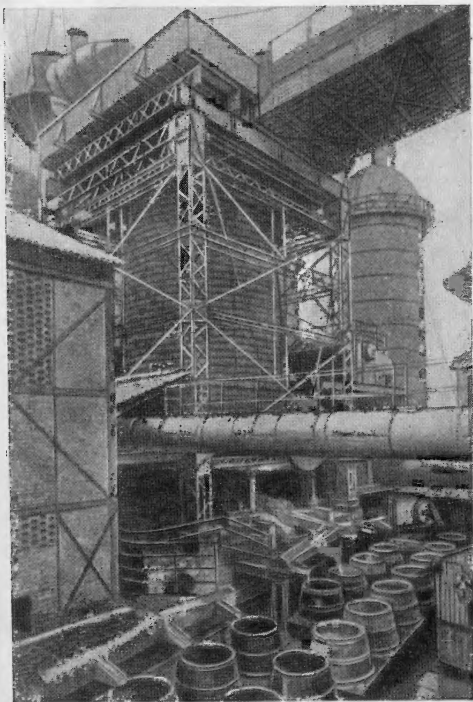


Рис. 1. Доменная печь середины XIX в.

Чугун как готовый материал доменной плавки может быть использован только для литья. Хрупкость и твердость чугуна не дают возможности применить его в целом ряде technically важных случаев; он должен подвергнуться переделке в железо и сталь. Как мы видели, за тридцатилетие

1870—1900 гг. производство стали возросло в огромное количество (56 раз). Это было связано с изобретением новых эффективных способов получения стали из чугуна. В XVIII и первой половине XIX в. сталь выплавлялась дорогими и малопроизводительными способами. В кричном способе

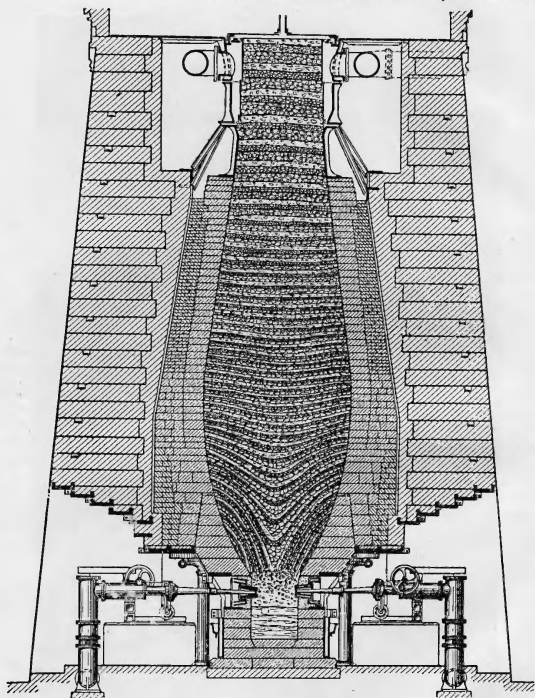


Рис. 2. Схема устройства доменной печи середины XIX в.

чугунная болванка плавится в горне и получающаяся расплавленная масса — крица подвергается проковке, вытягиванию и т. д. Этот способ применим только при плавке на древесном угле, так как каменный уголь содержит вредные примеси (серу, фосфор). На каменном угле сталь плавилась в пудлинговых печах, в которых чугун не приходит в соприкосно-

вание с топливом, а плавится на поду печи, при непрерывном перемешивании (пудлинговании) массы, как теста, рабочим. Ясно, что крица в пудлинговой печи получается неоднородная; её перерабатывают проковкой и вытягиванием массы в полосы или в прутья, которые затем сваривают в жару и проковывают для получения большей однородности. Сталь получалась также из железа путём цементирования. При этом способе железные полосы, пересыпанные углем, подвергаются продолжительному накаливанию, затем проковываются, вытягиваются и вновь цементируются, пока не получится сталь с желаемым содержанием углерода.

В 1856 г. Генри Бессемер сделал доклад о способе «получения железа и стали без горючих материалов». Бессемер предложил варить сталь в особых ретортах — конверторах. Чугун в конверторе продувается воздухом под значительным давлением. За счёт кислорода происходит горение железа, примесей и угля, сопровождающееся повышением температуры. Уголь выгорает быстрее железа, и потому получается масса более обезуглерожена, чем чугун. Температура повышается настолько, что сталь остаётся в жидком виде. Процесс совершается в течение получаса. Недостатком бессемеровского способа является необходимость взятия возможно чистого чугуна, так как сера и фосфор



Г. Бессемер

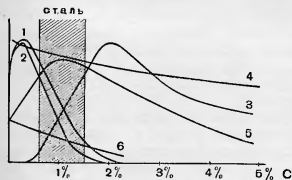


Рис. 3. Диаграмма влияния углерода на свойства стали:

1 — ковкость; 2 — свариваемость; 3 — твёрдость;
4 — температура плавления; 5 — крепость;
6 — вязкость

Только в 1878 г. англичанину Сиднею Томасу удалось разработать способ бессемерования фосфористого чугуна. Стенки реторты Бессемера выкладывались из огнеупорных кирпичей, богатых кремнекислотой, что придавало образующимся шлакам только кислый характер, т. е. шлаки были с большим содержанием окислов, неспособных связывать фосфор. Необходимо было изменить характер стенок в основной (щелочной), так как сильные щёлочи связывают фосфор. Томас приготовил огнеупорную массу из смеси

не выгорают вместе с C, Si и Mn. Поэтому бессемерование не применимо к фосфористым рудам. Сравнительно же чистых руд с малым содержанием фосфора было немного, в значительных количествах они встречались на Урале, в Испании, частично в Англии. Но русский чугун также мало подходил для бессемерования из-за незначительного содержания кремния, выгорание которого и развивало необходимую температуру для сгорания дальнейших примесей. Причина же того обстоятельства, что фосфор не связывался, долго оставалась невыясненной.



С. Томас

известии и магнезии, что дало возможность связывания фосфора в фосфорном чугуна. Этот способ бессемерования получил название томассирования.

Знаменитый русский учёный-металлург, основатель науки о металлах и металлургии Дмитрий Константинович Чернов (1839—1921) разработал в 1876—1877 г. русский способ бессемерования, позволяющий переделывать в сталь конверторным способом малокремнистый чугун. Изучая спектральным анализом процесс бессемерования, он добился получения этим способом высококачественных сталей. Бессемеровская реторта конца XIX — начала XX столетия вмещала до 15 т жидкого чугуна, содержащего примерно 350 кг кремния, 525 кг углерода и 350 кг марганца. Для сгорания этих примесей через реторту мощными воздуходувками в течение 12—15 минут продувается

1140 кг воздуха, что составляет примерно 6 тыс. куб. м. Приблизительно такое же количество требуется для сгорания части железа.

В 1865 г. братья Мартен предложили получать сталь и чистое железо посредством расплавления чугуна и железного лома на поду отражательных печей. Для получения необходимой высокой температуры применялась регенеративная печь Сименса¹. Так же как и в бессемеровании, в зависимости от характера пода различают кислый и основной процессы.

Применение мощного дутья в домнах и повышенная их производительность привели к отделению литья от процесса выплавки чугуна. Так, в конце XIX в. в Германии передельного чугуна в доменных печах выплавлялось в шесть раз больше, чем литейного. Вся эта масса чугуна переделывалась бессемерованием, томассированием, переплавлялась в мартенах, что привело к огромному увеличению производства стали для промышленности, транспорта и военного дела.

Металл обрабатывается в горячем виде ковкой и прокаткой. В 1842 г. дляковки был впервые применён паровой молот. Однако увеличение размеров поковок, связанных с увеличением размеров машин, заставило перейти на более совершенные ковочные прессы, вытеснившие молот. Так, только что изготовленный в конце XIX в. для фирмы South Berthlehem 125-тонный молот был разобран до начала эксплуатации и заменен 14 000-тонным прессом. Для изготовления листового стали и железа применялись прокатные станы. Переход к фигурному прокату потребовал конструкции специальных калиброванных валов и подготовительных обжимочных валов, снабжённых так называемыми ручьями, через которые проходит болванка при прокатке. Так, при прокатке рельса болванка проходит через 11 ручьёв. Проходя через первые четыре ручья, болванка поворачивается каждый раз на 90°, при переходе в пятый ручей она поворачивается на 180°,

¹ Регенеративная печь — печь, использующая теплоту отходящих продуктов горения для периодического подогрева поступающих в печь газов и воздуха и, тем самым, способствующих достижению более высокой температуры горения.

«Выставка 1900 г. была триумфом стальных отливок. Особенно выдавался мост Александра III — свод, сложенный из отдельных стальных пустотелых клиньев, не говоря уже о больших зубчатых колёсах, отливках

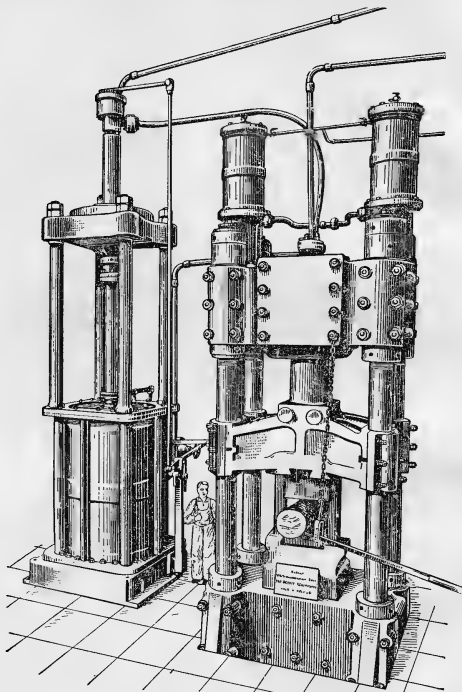


Рис. 6. Мощный гидравлический пресс середины XIX в.

самой сложной формы и т. д. Из стали отливают (например, в Сормове) такие части машин, как шатуны, кривошпы и т. д., ещё недавно, ввиду требующихся от них высоких качеств, считавшихся исключительной специальностью кузнечного дела (прокованный металл плотнее)»¹.

¹ «Промышленность и техника», СПб, т. II, 1902, стр. 317.

в ручье шестом она обжимается, при переходе в седьмой ручей поворачивается на 90° и далее до конца на 180° .

Широкое распространение получило литьё из стали.

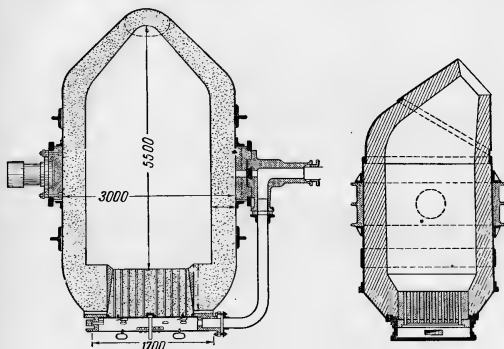


Рис. 4. Схема устройства бессемеровского конвертора

«В настоящее время, — читаем в одной из технических энциклопедий начала XX в., — область применения стальных отливок, особенно с тех

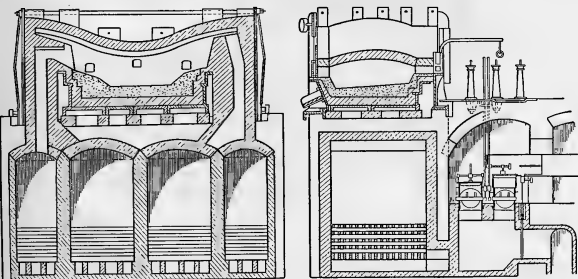


Рис. 5. Схема устройства мартеновской печи

пор, как усовершенствованы мартеновские печи, расширяется с каждым годом, и стальные отливки всё более и более вытесняют чугунные в машиностроении...»

Усиленно развивалось машиностроение. За 12 лет, с 1886 по 1898 г., продукция машиностроения в важнейших капиталистических странах возросла более, чем в два раза, в том числе в США в четыре с лишним раза, в Германии почти в три раза. Расширился и усовершенствовался станочный

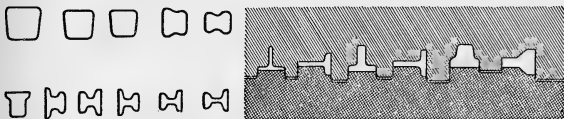


Рис. 7. Профили проката

парк (специализированные токарные, фрезерные, сверлильные, строгальные и другие станки), развивалось крупное энергетическое машиностроение. В развитии паровых машин основной тенденцией был переход к всё более высоким давлениям, к многократному расширению пара (машины-компаунд),

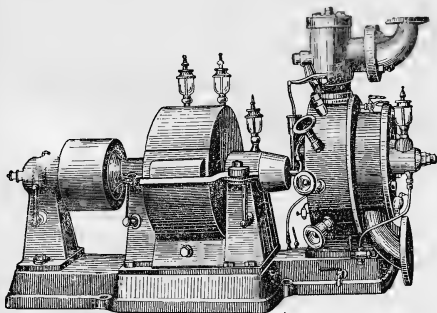


Рис. 8. Паровая турбина системы Лавала

к точному парораспределению с помощью клапанов. Машины с клапанным парораспределением стали внедряться в промышленность с Венской выставки 1873 г.; машины с двойным, тройным и четверным расширением — с 90-х годов; в морских паровых машинах применяемое давление пара доходило до 18 ат. Если до 40-х годов давление пара в котлах не превышало 3 ат, то к 90-м годам заводские котлы работали, как правило, на давлении 6—8 ат, а морские котлы имели 10 ат как нижнюю границу. Это предъявляло высокие требования к технике котлостроения.

Новинкой паровой энергетики была турбина, изобретение которой имело важное значение для электротехники. Шведский инженер Густав Лаваль (1846—1913) в связи с изобретённым им сепаратором для молока сконструировал в 1883 г. для его привода активную турбину, в 1889 г. — расширяющееся сопло. Разработкой конструкции турбины в качестве двигателя для электрических генераторов занимался английский инженер Парсонс. Первый турбогенератор был построен им в 1884 г.

В последнее тридцатилетие XIX в. родился и сделал первые шаги новый тип двигателя — двигатель внутреннего сгорания, получивший в XX в. широкое применение в автомобилях, авиации, водном транспорте и военном



Рис. 9. Паровая турбина системы Парсонса мощностью 1000 кВт для электростанции

деле. В 1860 г. французский техник и предприниматель Ленуар запатентовал первый двигатель внутреннего сгорания. В двигателе Ленуара, конструкция которого была весьма сходной с паровыми машинами, в течение первой части хода поршня происходило засасывание смеси светильного газа и воздуха, затем примерно на середине хода впускной клапан закрывался и замыкалась цепь индукционной катушки, искра вторичной обмотки которой воспламеняла смесь. Возникающее при взрыве давление до 5—6 ат толкает поршень дальше. При обратном ходе поршня происходил выхлоп отработанных газов.

Широкая реклама нового двигателя способствовала его распространению, в особенности в мелкой промышленности. В журналах и газетах появились статьи, возвещавшие, что век паровых машин кончился. Однако в процессе эксплуатации двигателей выяснилось, что расход газа на лошадиную силу составляет 3 куб. м в час вместо предполагавшегося ориентировочно 0,5 куб. м. Коэффициент полезного действия двигателя Ленуара составлял всего-навсего 3,3%, тогда как паровые машины того времени достигали к. п. д. 10%. В 70-х годах двигатель Ленуара сошёл со сцены, продержавшись дольше всего в мелких промышленных предприятиях.

В 1876 г. Отто и Ланген выставили на второй Парижской всемирной выставке новый двигатель мощностью в 0,5 л. с. Засасывание

газа происходило только на 0,1 хода поршня; затем следовал взрыв и поршень следовал вверх, причём давление в цилиндре падало с 4—6 ат до разрежения. В верхнем положении (двигатель был вертикальным) шток поршня зацеплялся за кривошип и приводил в движение вал двигателя за счёт работы атмосферного давления при движении поршня вниз. Несмотря на несовершенство конструкции этого двигателя, напоминающего первые пароатмосферные машины, он показал высокую по тому времени

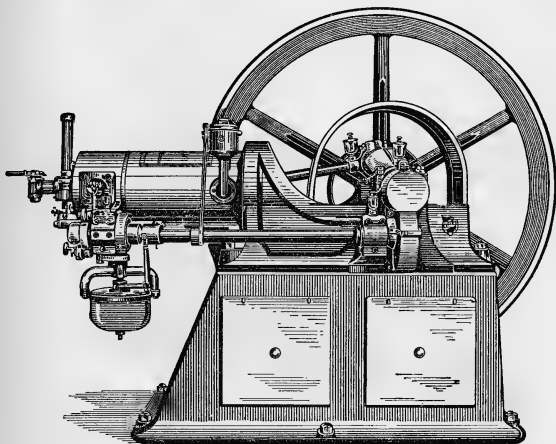


Рис. 10. Один из первых двигателей Отто

экономичность; расход газа составлял 0,82 куб. м на лошадиную силу в час и к. п. д. составил 14%. За 10 лет для мелкой промышленности было построено около 10 000 таких двигателей.

В 1878 г. Отто построил по идее Боуде-Роша четырёхтактный двигатель. При первом такте засасывалась смесь из светильного газа (10%) и воздуха (90%). При обратном ходе поршня смесь сжималась, в конце хода в мёртвой точке происходило воспламенение, давление достигало 11 ат; третий рабочий ход — расширение, при котором давление падало до 3 ат, при следующем обратном ходе происходил выхлоп.

Одновременно с использованием газа в качестве горючего стала разрабатываться идея использования паров бензина, газolina, лигроина в качестве материала для горючей смеси, а с 90-х годов и керосина. Расход горючего в этих двигателях составлял около 0,5 кг на лошадиную силу в час.

В 1893 г. немецкий инженер Рудольф Дизель (1858—1913) выступил с брошюрой «Теория и конструкция рационального теплового двигателя», в которой выдвинул идею приближения в реальном двигателе к циклу Карно. Для этого он предложил взять в качестве горючего угольную пыль,

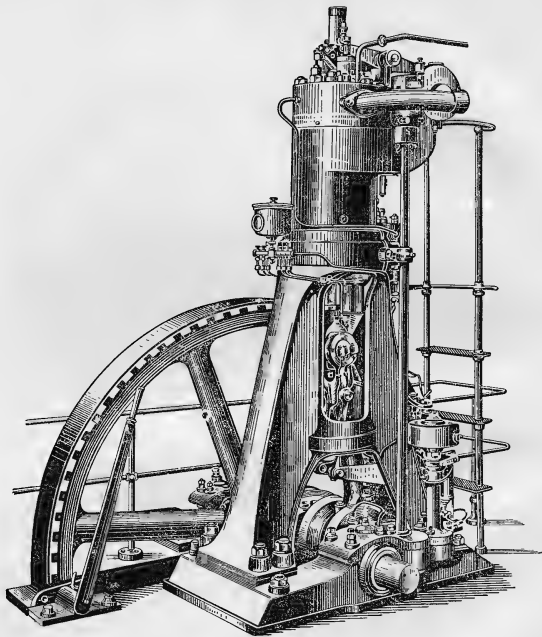


Рис. 11. Один из первых дизелей

осуществлять сильное сжатие воздуха до температуры горения топлива. Топливо вводится в горячий сжатый воздух не сразу, а постепенно, и теплота, расходуемая при постепенном сгорании, превращается в работу. В конце 1895 г. Дизелем после многих опытов был изготовлен первый простейший двигатель, работавший как на керосине, так и светильном газе (от угольной пыли в процессе экспериментирования пришлось отказаться). Месячная эксплуатация этого двигателя обнаружила в нём ряд

конструктивных недочетов. На основе анализа работы этого двигателя в 1897 г. был построен новый двигатель, работавший на керосине по четырёхтактному циклу. В течение первого такта поршень движется вверх, засасывая воздух. Во втором такте воздух сжимается до температуры воспламенения керосина. В конце второго такта насосом подаётся керосин в течение определённого периода — периода впуска; воспламенившиеся газы производят работу расширения; четвёртый такт — выхлоп. Испытания показали, что этот двигатель при расходе горючего 250 г керосина на лошадиную силу в час давал средний к. п. д. в 25,7%. После этих испытаний Дизель снизил расход горючего до 215 г на лошадиную силу в час и повысил к. п. д. до 30%. Наступала эпоха моторов.

Авиация.

Новые двигатели помогли разрешению давнишней задачи — управляемого полёта.

Вторая половина XIX столетия характеризуется кроме других своих особенностей наличием обострённого интереса широких обществен-

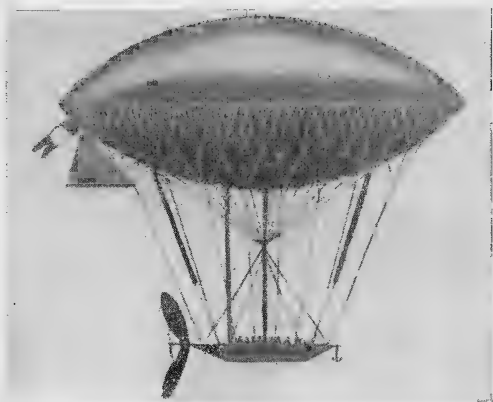


Рис. 12. Один из первых дирижаблей

ных кругов к проблеме воздухоплавания. Показательно, что первый фантастический роман знаменитого Жюль Верна был посвящён этой проблеме. Очень интересен с точки зрения характеристики умонастроения эпохи его другой роман «Робур завоеватель», в котором освещается вопрос о двух возможных решениях проблемы управляемого воздухоплавания: на аппаратах легче и тяжелее воздуха. Знаменитый романист с присущей ему проницательностью стал на сторону второй точки зрения. Следует отметить, что предвосхищённый им проект геликоптерного корабля, приводимого в движение легкими электрическими источниками, в свете современной техники является вполне перспективным.



К. Э. Циолковский

Проблемой авиации занимались многие выдающиеся деятели русской науки. Назовем Д. И. Менделеева, А. Н. Лодыгина, Д. К. Чернова, К. Э. Циолковского, Н. Е. Жуковского. К ним следует прибавить имена многих изобретателей и в первую очередь создателя первого в мире самолёта Александра Фёдоровича Можайского (1825—1890).

Д. И. Менделеев видел в аэронавигации мощное средство научных исследований и после получения сообщения о высотном полёте на воздушном шаре Глешера и Коксвелла (в 1862 г. поднялись на высоту 11 км) писал: «Меня так заняла мысль подняться выше знаменитого англичанина и постичь закон наслоения воздуха при нормальном наслоении атмосферы, что временно оставил другие занятия и стал изучать аэростатику»¹. Д. И. Менделеев разработал про-

ект стратостата и управляемого аэростата, летал на аэростате Жиффар и в 1887 г. совершил свой знаменитый полёт с целью наблюдения солнечного затмения.

В 1872 г. поднялся на управляемом аэростате своей конструкции Дюпюи-де-Лом. Приводя в действие движитель руками, он получил собственную скорость около 2 м/сек.

В 1884—1885 гг. французские офицеры Ренар и Кребс построили дирижабль «Франция» объёмом 1870 куб. м с подъёмной силой 2,2 т. Дирижабль приводился в движение электромотором мощностью 9 л. с., весом 400 кг. Дирижабль развивал собственную скорость 6,5 м/сек.

Иная участь ожидала выдающиеся изобретения в условиях царской России.

В 1887 г. на заседании Общества любителей естествознания и антропологии знаменитый деятель науки, тогда ещё скромный учитель гимназии Константин Эдуардович Циолковский, сделал доклад о разрабатываемом им в течение двух лет проекте управляемого металлического пассажирского дирижабля с гофрированной оболочкой. А. Г. Столетов заинтересовался работой Циолковского, и передал рукопись доклада на отзыв Н. Е. Жуковскому, который поддержал талантливого изобретателя и общество выдало Циолковскому небольшую субсидию на постройку модели. Модель Циолковский представил в 1890 г. Посылка с текстом доклада и разборной моделью была адресована Д. И. Менделееву. Но здесь, несмотря на поддержку Менделеева, несмотря на то что расчёты были признаны правильными, сама идея управляемости аэростата была подвергнута критике председателем воздухоплавательной секции. Циолковский вновь и вновь экспериментирует, проверяет свои расчёты и впервые в мире подвергает модели испытанию в сконструированной им аэродинамической трубе.

Насколько был прав Циолковский, придавая важное значение форме

¹ Цит. по В. В. Данилевскому. «Русская техника», Гостехиздат, 1940, стр. 411.



А. Ф. Можайский



Н. Е. Жуковский

корабля, видно из следующего поучительного примера. В 1897 г. немецкий инженер Шварц сконструировал металлический дирижабль с керосиновым двигателем. Вследствие нелепой формы аппарата, оболочка после первого же полёта оказалась настолько помятой, что дальнейшие полёты сделались невозможными.

Катастрофой закончился и другой полёт дирижабля с керосиновым двигателем, на этот раз с трагическим исходом. В 1898 г. немецкий изобретатель Вёльферт вместе с механиком Кнабе предпринял испытательный полёт дирижабля с мягкой оболочкой своей конструкции. При испытании произошёл взрыв и оба пилота погибли.

Неудачи не останавливали поисков, и к концу XIX в. управляемые дирижабли, приводимые в движение двигателями внутреннего сгорания, вошли в технику воздухоплавания.

Следует отметить, что первые проекты дирижабля с двигателем внутреннего сгорания принадлежали русскому изобретателю О. С. Костовичу, начавшему разработку дирижабля в 70-х годах. В 1881 г. Костович приступил к постройке полужёсткого дирижабля объёмом 5000 куб. м с двигателем внутреннего сгорания. Были изготовлены двигатель и все детали, однако собранных по подписке денег не хватило, а правительство не поддержало изобретателя.

Наряду с разработкой проектов управляемых аэростатов, развивалась и другая идея — полёта на аппаратах тяжелее воздуха. Трудность управления аэростатами, их беспомощность в борьбе с ветрами и штормами, плохая маневренность, опасность воспламенения газа и оболочки (гелий не был известен) вызывали серьёзную критику идеи управляемого полёта на аппаратах легче воздуха.

В 1882 г. состоялись первые в мире испытания самолёта конструкции А. Ф. Можайского. Самолёт Можайского имел все основные части будущих самолётов: несущие плоскости и хвостовое оперение, винтомоторную группу, рулевое управление, шасси. При испытании аппарат был

повреждён и реакционные правительственные круги на этом основании отказали талантливому изобретателю в средствах на дальнейшие опыты. Такая же участь постигла предложения и другого талантливого изобретателя В. В. Котова, разрабатывавшего планёры. Не нашлось средств даже для напечатанья его работы «Самолёты — аэропланы, парящие в воз-

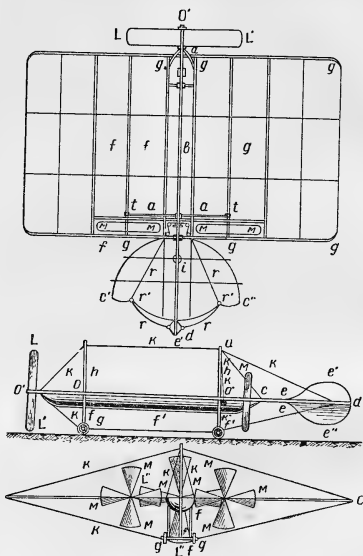


Рис. 13. Чертёж самолёта Можайского

духе», предисловие к которой было написано Д. И. Менделеевым. Не было реализовано и разработанное в 1895 г. изобретение К. Э. Циолковского, предложившего проект моноплана. Конструкция Циолковского была описана им в работе «Аэроплан, или птицеподобная (авиационная) машина».

В 90-х годах начали появляться классические теоретические работы отца русской авиации Николая Егоровича Жуковского. В 1890 г. в ЖРФХО была опубликована его статья «К теории летания», в следующем (1891) году в «Трудах Отделения физических наук О-ва любителей естествознания» был опубликован его доклад «О парении птиц». После этого в 90-х годах был помещён Жуковским ряд статей и заметок по вопросам воздухоплавания и, наконец, в 1906 г. появилась его знаменитая работа «О присоединённых вихрях».

В России был сконструирован первый самолёт, создана первая теория полёта. Россию по праву следует считать родиной авиации. Но политический гнёт, общая технико-экономическая отсталость царской России не дали возможности завершить начинания Можайского и Жуковского.

17 декабря 1903 г. братья Райт в Америке поднялись в воздух на биплане, который был снабжён двигателем внутреннего сгорания мощностью 16 л. с. Им удалось продержаться в воздухе 59 секунд, пролетев 200 м. В 1905 г. С а н т о с - Д ю м о н в Европе пролетел 220 м. 25 июля 1909 г. Б л е р и о перелетел Ламанш. Наступала эпоха авиации.

Нелегки были первые шаги новой техники. Они требовали больших материальных средств и человеческих жертв. Например, известный изобретатель пулемёта М а к с и м израсходовал на свой самолёт свыше 300 000 тыс. долларов и самолёт не полетел. Изобретатель А д е р израсходовал на свои аппараты безрезультатно до полумиллиона франков личных средств и до 700 тыс. франков правительственной субсидии. На трагическую гибель О т т о Л и л и е н т а л я с глубоким сочувствием отзывались учёные всего мира и в первую очередь Н. Е. Жуковский. Лилиенталь начал заниматься полётами ещё на школьной скамье и вплотную приступил к ним после франко-прусской войны 1870—1871 гг. Он изготовил монопланый



Отто Лилиенталь



Орвиль Райт



Вильбур Райт



Рис. 14. Самолёт братьев Райт в воздухе

планёр с поддерживающей поверхностью 110 кв. м при размахе крыльев 7 м . Планёр поднимал 100 кг (вес изобретателя и аппарата). Начав полёты с высоты 5 м и длиной полётного пути в $6\text{—}7 \text{ м}$, Лилиенталь в 90-х годах совершил полёты уже с высоты 80 м . Ему принадлежат и ценные теоретические исследования по вопросам парения в воздухе. Он проектировал постройку машины с двигателем мощностью $2,5 \text{ л. с.}$, весом 40 кг . Осуществить этот проект Лилиенталью не удалось: 9 августа 1896 г. он погиб во время полёта.

Многочисленные жертвы авиации, несовершенство первых аппаратов приводили даже крупных специалистов к скептическим оценкам возмож-



Рис. 15. Полёт Сантос-Дюмона

ностей авиации. Так, в докладе в Британском обществе инженеров инженер Г. Чэтли говорил в 1908 г.:

«Внезапное развитие воздухоплавания вызвало общую ни на чём не основанную панику. В настоящее время управляемый воздушный шар далеко не отличается неуязвимостью, не может поднимать больше нескольких фунтов разрывных снарядов и с большим трудом попадает в цель. При разведках он, конечно, может оказать пользу. Аэропланы, пожалуй, могут быть теперь применены для некоторых военных целей и в особенности

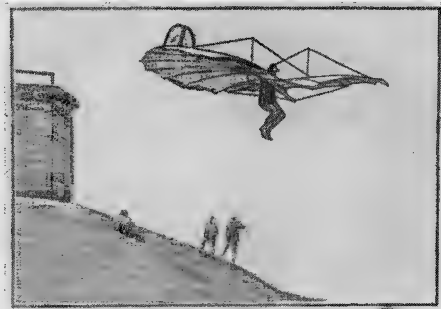


Рис. 16. Один из полётов Лилиенталя

для передачи депеш, но ещё пройдёт много времени, пока можно будет рассчитывать на их устойчивость во время ветра.

С коммерческой точки зрения перспектива ещё безотраднее. Хотя требуемая энергия для перелёта только незначительно больше, чем при сухопутном и морском сообщении, тем не менее пройдут ещё многие годы, прежде чем можно будет рассчитывать на безопасность и правильность воздушного сообщения. Иногда ветер будет оказывать сильное влияние на направление и время переезда. В конце концов, разумеется, и воздушный корабль и летательная машина окажут своё влияние на жизнь народов, но я думаю, что этот момент наступит ещё не так скоро» («Nature», 1909, № 2049).

Энтузиасты нового дела думали иначе. Уже в 1896 г. К. Э. Циолковский, предвосхищая запросы современной техники, разрабатывал теорию реактивного движения и космических полётов. Авиация быстро завоевала одно из первых мест в области техники.

Излагая историю первых шагов авиации, мы отклонились в сторону от истории развития энергетики.

Электротехника. Конец века характеризуется быстрым и решительным прогрессом электротехники, благодаря которому XIX в. вошёл в историю как век пара и электричества. И в эту важнейшую отрасль науки и техники русская научная мысль внесла вклад фундаментального значения. Мы уже отмечали в первом томе основопо-

ложное значение работ В. В. Петрова, П. Л. Шиллинга, Э. Х. Ленца, Б. С. Якоби. Телеграфия, гальванопластика, электродвигатели, электрические измерения, световые и тепловые действия тока — таков круг вопросов, поднятый русскими электрофизиками первой половины XIX в., в разработке которых они опережали зарубежных учёных. Теперь на очередь стал вопрос всестороннего использования преимуществ электрической энергии: её гибкости, лёгкой превратимости и управляемости, способности передаваться на расстояние. Были выдвинуты и решены следующие основные проблемы электротехники:

1. Проблема построения мощных, дешёвых и надёжных источников электрической энергии.

2. Проблема передачи энергии от источника энергии к потребителю.

3. Разработка рациональных приёмников электрической энергии (электрическое освещение, двигатели).

Разумеется, все эти проблемы теснейшим образом связаны друг с другом, и успех в одной области стимулировал прогресс и в других областях. Следует отметить одно очень важное для истории физики обстоятельство, что развитие новой отрасли техники теснейшим образом связано с успехами физики. Энгельс был глубоко прав, когда писал в известном письме к Штаркенбургу: «Об электричестве мы узнали кое-что разумное только с тех пор, как была открыта его техническая применимость»¹. Предшествующие открытия в электричестве, связанные с именами Эрстеда, Ампера, Фарадея и Ленца, позволили нащупать возможность технических применений новой отрасли физики: были открыты тепловые и световые действия тока, были открыты его химические действия и электромагнитное движение. Были построены и первые электродвигатели и первые электрические светильники. Ленц и Якоби доказали обратимость динамо-машин, с 1844 г. начали (Фуко) строить регуляторы для дуги Петрова, в 1845 г. предлагался проект получения электрического света накаливанием (Кинг), в том же году русский изобретатель Борщевский предложил получать электрический свет от разогретых проводников 2-го рода (минералов). Но особенно важным было изобретение телеграфа (Шиллинг, Морзе, Якоби), которое удовлетворяло действительно назревшие потребности общества в быстрой и надёжной связи. «Важное применение электромагнетизма к телеграфии, — писал Максвелл в предисловии к своему «Трактату», — повлияли на чистую науку, придав коммерческую цену точным электрическим измерениям и дав изучающим электричество возможность использования аппаратов в таких масштабах, которые значительно превосходят возможности обыкновенной лаборатории».

Эти аппараты начали производиться техникой с 50-х годов, и уже в 1850 г. в Германии возникла электротехническая фирма Сименс и Гальске, превратившаяся к концу века в мощное капиталистическое предприятие. Людям практики были ясны возможности электрической силы, они предъявляли спрос на изучение её законов. «Следствия этого спроса на познания в области электричества и этих экспериментальных возможностей их приобретения, — пишет Максвелл, — уже были весьма большими как в стимулировании передовых работающих в области электричества учёных, так и в распространении среди людей практики такой степени точного знания, которое имеет шансы повести к общему научному прогрессу всей инженерной профессии».

¹ К. Маркс и Ф. Энгельс, Избранные письма, Госполитиздат, 1947, стр. 469—470.

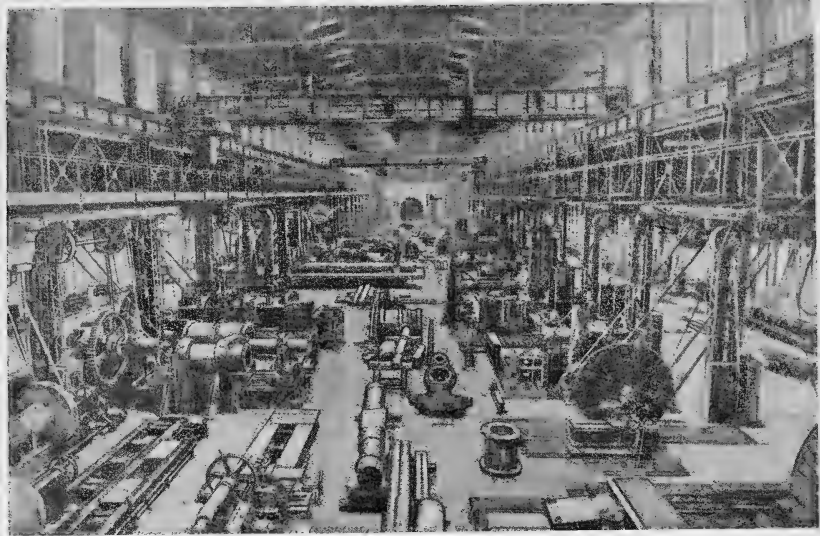


Рис. 17. Электротехнический завод

И именно практика заставила в конце концов физиков освоить идею магнитного потока и изучить свойства магнитных материалов, исследовать электрические колебательные процессы и освоить учение об электромагнитных волнах. Но пока, как мы увидим из дальнейшего изложения, многое приходилось находить ощупью, без ясного представления о сущности используемых процессов.

Прежде всего было ясно, что прогрессу электротехники мешает отсутствие дешёвых, компактных и мощных источников тока. Элементы Грове (1839) и Бунзена (1843) давали возможность получать достаточно сильные токи, достаточно постоянной силы. Они позволили осуществить ряд экспериментов с двигателями и освещением. Но как они не соответствовали техническим запросам можно видеть из приводимого В. Н. Чиколевым письма к редактору французского журнала «Люмьер электрик» («Электрический свет») об опытах Шанжи по электрическому освещению:

«Очарованный тем, что я видел у г. де Шанжи в 1859 г., я сказал об этом моему другу архитектору Ленуару, строившему в это время на Страсбургском бульваре громадное кафэ. Какая заманчивая мысль осветить новое кафэ новым электрическим светом!! По расчёту оказалась надобность в 300 источниках, и я отправился с этим к Шанжи, который с отчаянием указал мне на ту батарею, которая необходима для его четырёх рожков. Увы! для батарей Бунзена, в 300 источников, Шанжи понадобилось бы выстроить громадное здание, едва ли менее самого кафэ»¹.

К этому красноречивому свидетельству следует добавить дороговизну расходуемых в элементах материалов и их недолговечность (быстрое «сгорание»). Вместе с тем эти источники имели ряд преимуществ по сравнению с тепловыми двигателями, и понятно, как напряжённо работала изобретательская мысль над рациональной конструкцией элементов.

Из всех многочисленных проектов и конструкций элементов, имеющих реальное значение, отметим наряду с элементами Даниэля, Грове и Бунзена элементы Мейдингера, Грене и Лекланше, из которых последние служат и до настоящего времени в технике слабых токов. Задача конструкторов в данном случае сводилась к устранению поляризации, приводящей к ослаблению электродвижущей силы элемента. Под гальванической поляризацией вообще подразумевается совокупность тех физико-химических изменений на электродах, которая возникает в результате прохождения тока через электролит. Чтобы устранить эти изменения, применяют деполяризаторы.

Деполяризационные элементы получили особое значение в электроизмерительной технике, так как ввиду своего постоянства могли служить эталонами электродвижущих сил. До конгресса электриков 1881 г. в обычае было измерять электродвижущую силу в даниэлях, т. е. в электродвижущих силах элемента Даниэля, а позднее в кларках. Элемент Латимера Кларка (рис. 18) (1874) содержит в качестве деполяризатора малорастворимую

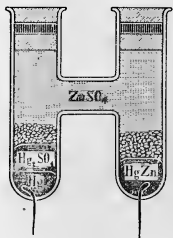


Рис. 18. Элемент Кларка

¹ В. Н. Чиколев, Избранные труды, Госэнергоиздат, 1951, стр. 30—31.

серноокислую соль закиси ртути Hg_2SO_4 . Electroдами служат цинк и ртуть, электролитом серноокислый цинк ZnSO_4 .

Вестон в 1892 г. предложил элемент с весьма малой зависимостью э. д. с. от температуры, который отличается от элемента Кларка заменой цинковой амальгамы кадмиевой (HgCd) и соответственно серноокислого цинка серноокислым кадмием (CdSO_4). Но поляризационные изменения, помимо отрицательной стороны, имеют и положительную сторону. Благодаря поляризации возможно изготовление так называемых вторичных элементов, или аккумуляторов. Возможность таких элементов была доказана ещё в начале XIX в., вскоре после открытия вольтова столба. Если пропустить ток через электролит, налитый в сосуд с двумя одинаковыми электродами, то на электродах произойдут поляризационные изменения и возникнет электродвижущая сила (заряд). После отключения сосуда от внешнего источника он сам превратится в источник, и если его замкнуть, то начинается процесс деполяризации, т. е. уменьшения поляризационной э. д. с. (разряд). Однако такие вторичные элементы дают непостоянную э. д. с. и крайне непродолжительный, быстро убывающий разрядный ток.

В 1859 г. Планте изготовил свинцовый аккумулятор, в котором свинцовые пластинки, помещённые в раствор серной кислоты, посредством продолжительной ф о р м о в к и (попеременной зарядки и разрядки) превращались в электроды, дающие достаточно устойчивую разность потенциалов.

«Электровозбудительная сила элементов Планте, — писал Чиколев в своей «Истории электрического освещения» в 1880 г., — в полтора раза более элементов Бунзена, сопротивление при одинаковых размерах с последними может быть сделано до ста раз менее, и потому элемент Планте можно считать в 150 раз сильнее бунзеновских... По цене, производительности и удобствам элементы Планте вполне пригодны для практики, но, к сожалению, они могут запасать только очень ничтожное количество электричества; они принимают на текущий счёт¹ слишком небольшие ресурсы для практики, и только поэтому настоящее применение их почти невозможно»².

Сам Чиколев в 1874 г. начал работу над гальваническими обратимыми элементами с цинком и перекисью свинца, исходя из того, что в обратимых элементах типа Даниэля можно запасать электричество на сотни часов непрерывного действия.

В 1881 г. Ф о р стал покрывать пластинки специальной массой (суримом), что приводило к уменьшению времени формовки и увеличению ёмкости. Первые аккумуляторы Фора были очень непрочны, масса легко выпадала. Но вскоре лейтенант русского флота А. М. Х о т и н с к и й внёс первые усовершенствования, за ним последовали другие, и технически годные свинцовые аккумуляторы начали выпускаться электротехническими фирмами.



Рис. 19.
Аккумулятор
Планте

¹ Чиколев сравнивает зарядку аккумуляторов с вкладом на текущий счёт в банк.

² В. Н. Чиколев, Избранные труды, стр. 46—47.



В. Н. Чиколев

При всех достоинствах свинцовых аккумуляторов они обладают и серьёзным недостатком: большой вес и неполная обратимость. Пластины при разряде ниже определённого предела покрываются слоем сульфата, аккумуляторы портятся при коротком замыкании, требуют большого ухода. Поэтому техника искала новых типов аккумуляторов, более лёгких по весу, более простых по уходу и менее требовательных к перегрузке. В 1899 г. Юнгер и в 1900 г. Эдисон взяли патент на железо-никелевые щелочные аккумуляторы. Катод состоит из активной массы мелкозернистого железа с примесью ртути, активная масса анода — окись никеля (Ni_2O_3), электролитом служит раствор едкого калия.

Первые аккумуляторы нового типа Эдисон выпустил в 1903 г.

Чрезвычайно интересные по идее элементы и аккумуляторы были предложены знаменитым русским электриком

П. Н. Яблочковым (1847—1894). «С 1882 г. я, — говорит Яблочков, — начал работать над получением электричества посредством элементов, не пользуясь механической энергией, и я взял привилегию на элемент с натрием»¹. Эта работа была прервана болезнью Яблочкова.

После болезни Яблочков вернулся к работе над элементами. С 1884 по 1889 г. он занимался, по собственному выражению, «производством электричества химическим путём».

Вот краткое описание некоторых изобретений Яблочкова. В чугунном сосуде расплавляется NaNO_3 , в который погружается угольная палочка. Уголь, окисленный кислородом селитры, становится катодом, чугун играет роль анода.

Горизонтальный электрод в форме чаши из угля или свинца заполняется мелко раздроблённым углем или губчатым свинцом, или свинцовой амальгамой (в зависимости от материала чаши). Дно чаши имеет отверстие, закрытое гофрированной перегородкой, и соединяется с газопроводной трубкой. Чаша закрывается картонкой или войлочной крышкой, к которой плотно прижимается пластина из пористого угля. По трубе подаётся в массу размельчённого угля (или губчатого свинца) водород, а в порах угольной пластины концентрируется кислород окружающего воздуха. Пластина будет анодом, чаша катодом.

В трёхэлектродном автоаккумуляторе Яблочков использует поляризацию для автоматического создания э. д. с. В угольно-натровом элементе под действием влажности воздуха создаётся э. д. с. около 4 в.

Яблочков стремился разработать мощные экономически выгодные способы превращения химической энергии в электричество и во многом опередил свой век. Его мысль о непосредственном применении химической

¹ М. А. Шателен, Русские электротехники, Госэнергоиздат, 1949, стр. 135.

энергии в электротехнике может при её реализации послужить началом новой эры электротехники.

В том же направлении мыслил и другой выдающийся русский электротехник В. Н. Чиколев, в своей практической деятельности шедший путём, отличным от Яблочкова. Он считал возможным аккумулировать энергию ветра, воды в химических источниках электричества. «Только электричество, — восклицал Чиколев, — в состоянии не выпустить солнце скрыться за горизонт, прежде чем оно не обеспечит нам освещение на всю ночь, до предстоящего его восхода»¹.

«Я не сомневаюсь, — говорил он далее, — ...что перестанут жечь уголь для передвижения поездов железных дорог и попросят солнце принять на себя этот почтенный труд...»; «ветряные двигатели... будут запасать электричество в виде редких химических продуктов...»² Идеи Яблочкова и Чиколева несомненно будут использованы в энергетике будущего. «К сожалению, — резюмирует проф. М. А. Шателен, — ни тот, ни другой из наших изобретателей и ни один из работавших над этим вопросом после них, вплоть до настоящего времени, поставленную перед собой задачу не решил, и электромагнитный генератор является до сих пор наиболее надёжным и единственным достаточно мощным для практических целей источником электрического тока».

Эволюция электромагнитного генератора была обусловлена растущим применением электричества. Ещё Ленц и Якоби доказали обратимость магнитоэлектрических машин: генератор может быть обращён в электродвигатель.

В 1873 г. на выставке в Вене демонстрировался генератор постоянного тока с кольцом Грамма, приводивший в движение такой же электродвигатель. Машина потребляла энергию от парового двигателя, мотор приводил в движение насос. Эта установка, понятно, имела чисто демонстрационное значение и не раскрывала возможностей передачи электрической силы на расстояние. Опыт первого технического использования электрической силы был проведён во Франции в г. Сен-Тома, где ток от динамомашин был передан в артиллерийские мастерские на расстоянии 60 м. Электродвигатель приводил в движение станки. В 1879 г. на берлинской выставке В. Сименс демонстрировал первый электрический трамвай.

В 1874—1875 гг. опыты по передаче электрической энергии проводил в Петербурге Ф. А. Пирцкий. Ток от динамо мощностью в 6 л. с.

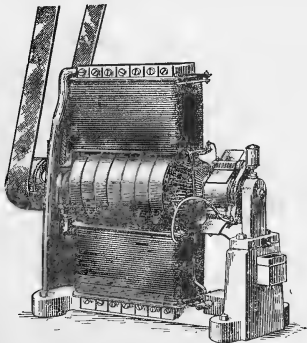


Рис. 20. Один из первых генераторов — машина Сименса-Гальске со стоячими электромагнитами

¹ М. А. Шателен, Русские электротехники, стр. 52.

² Там же, стр. 54.

передавался такому же электродвигателю сначала на $\frac{1}{50}$ м, потом на 1 км. Пироцкий опубликовал в 1877 г. работу «О передаче работы воды как двигателя на всякое расстояние посредством гальванического тока». Здесь была ясно сформулирована идея огромной важности: использование электричества для передачи энергии на расстояние. Пироцкий в 1876 г. осуществил опыт передачи электроэнер-

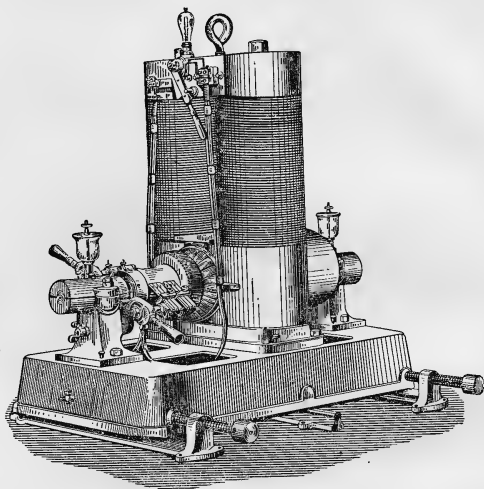


Рис. 21. Генератор Эдисона с нижним расположением якоря

гии по рельсам железной дороги на 3,5 км, а в 1880 г. приводил в движение вагон по рельсам «конки», т. е. конной железной дороги в Песках в Петербурге.

Но Пироцкий не нашёл принципа экономической передачи электроэнергии на расстояние. Принцип этот был найден в 1880 г. выдающимся русским электротехником Дмитрием Александровичем Лачиновым (1842—1902) и опубликован им в статье в журнале «Электричество», носящей название «Электромеханическая работа». Принцип этот заключался в повышении напряжения с увеличением расстояния и передаваемой мощности. Теоретическими расчётами Д. А. Лачинов доказал, что «можно передать работу на весьма значительное расстояние, не опасаясь экономических невыгод». Насколько нова и революционна была эта мысль, можно судить по тому, что Фонтен, осуществивший в 1873 г. упомянутую выше электропередачу на венской выставке, писал, что при помощи динамо-электрических машин «можно только передать энергию на небольшие рас-

стояния, например для приведения в действие станков, подъемников, вентиляторов, одним словом — механизмов, которые ныне приводятся в действие ремёнными или канатными передачами». Русский новатор видел дальше и глубже, чем узкие эмпирики за рубежом.

В 1881 г. французский инженер Марсель Депре (1843—1918) сделал доклад на тему об электропередаче на конгрессе электриков в Париже. В следующем 1882 г. Депре осуществил передачу энергии водопада в Мис-

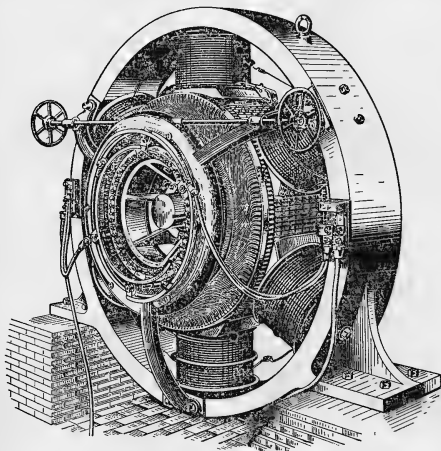


Рис. 22. Шестиполюсный генератор конца XIX в.

бахе на мюнхенскую выставку, построив генератор постоянного тока небольшой мощности напряжением в 2000 в по телеграфной проволоке. Дальность передачи была 57 км, коэффициент полезного действия составлял около 22%. Электродвигатель, установленный на выставке, приводил в движение насос фонтана. Установка была чисто демонстрационной, работала ненадёжно, но она имела огромное значение, показав наглядно возможности электроэнергии.

Энгельс писал по поводу этой установки: «... Новейшее открытие Депре, что электрические токи очень высокого напряжения со сравнительно слабой потерей силы могут передаваться по простой телеграфной проволоке на неслыханные до сих пор расстояния и быть применёнными на конечном пункте — дело это находится еще в зародыше, — окончательно освобождает промышленность почти от всех местных границ, делает возможным употребление даже самых отдаленных водяных сил. И если даже вначале этим воспользуются только города, в конце концов оно должно стать самым могущественным рычагом для уничтожения антагонизма между горо-

дом и деревней. Но что вместе с этим производительные силы примут такие размеры, при которых они перерастут руководство буржуазии, совершенно очевидно»¹.

К этим пророческим мыслям Энгельса мы ещё вернёмся в конце обзора развития электротехники. Продолжая этот обзор, отметим прежде всего, что возможности передачи лимитировались необходимостью получать высокие напряжения. Теоретические расчёты Л а ч и н о в а, установки

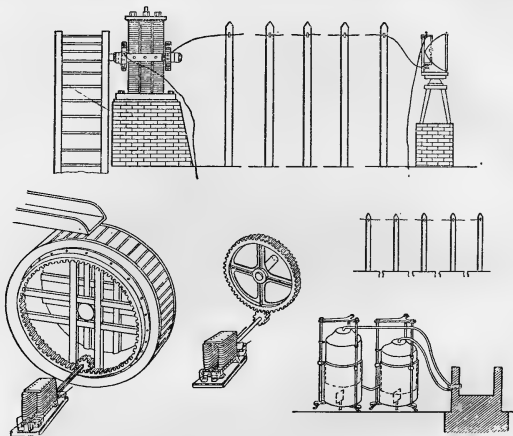


Рис. 23. Один из первых проектов передачи энергии на расстояние, принадлежащий Ф. А. Пирецкому

П и р о ц к о г о и Д е п р е относились к постоянному току. Д е п р е в дальнейших опытах дошел до напряжений в 6 тыс. в, и это было почти «потолком» для надёжно работающих генераторов и двигателей постоянного тока. Применяя систему последовательного соединения генераторов и двигателей, можно было довести напряжение до 100 тыс. в. Интересно отметить, что деятельную роль в поисках повышения напряжения играл тот же Фонтен, который, как мы видели выше, не видел путей передачи энергии на расстояния, большие обычных трансмиссий. Для преобразования тока применялись умформеры, и всё же возможности передачи энергии постоянным током были весьма ограниченными.

М. О. Доливо-Добровольский так характеризовал положение, сложившееся в электротехнике в 80-х годах прошлого века:

«Постоянный ток хорошо подходил для любых применений. Наряду с освещением применялись электродвигатели с отличными характери-

¹ Сб. «Маркс, Энгельс, Ленин, Сталин о технике», Гостехиздат, 1934, стр. 165.

ками¹, имелась возможность аккумуляирования, химического использования и получения тепла. Благодаря начавшемуся подъёму электротехники самые смелые мечты стали возможными в ближайшее время. Но было одно препятствие, к сожалению трудно преодолимое, которое угрожало всему прекрасному развитию. Это необходимость передачи больших количеств электроэнергии на большое расстояние с тем, чтобы распределить её в отдалённых районах. Знали, что для этого нужно высокое напряжение. В установках постоянного тока потребители присоединяются непосредственно к генераторному напряжению. Для повышения напряжения имелись две возможности: многопроводные сети по образцу трёхпроводной системы Эдисона — Гопкинсона или умформерные станции... Было ясно, что возможности при постоянном токе были еще недостаточны для действительно крупных установок².

И техника искала новых путей, новых возможностей получения «действительно крупных установок». Такие пути, такие возможности открывались применением переменного тока. Борьба за переменный ток составляет содержание прогресса электротехники в последнее двадцатилетие XIX в. Пионером в деле применения переменного тока был П. Н. Яблочков (1847—1894). Яблочков работал над проблемой электрического освещения.

В то время вырисовывались два пути решения этой проблемы: использование накаливания током проводников, т. е. использование закона Джоуля-Ленца, и второй — использование дуги Петрова. Приоритет в изобретении лампы накаливания принадлежит опять-таки нашему соотечественнику А. Н. Лодыгину (1847—1923). Изобретение лампы Лодыгина относится к 1873 г. В его лампе накаливаемым телом был угольный стержене́к (однако он проводил

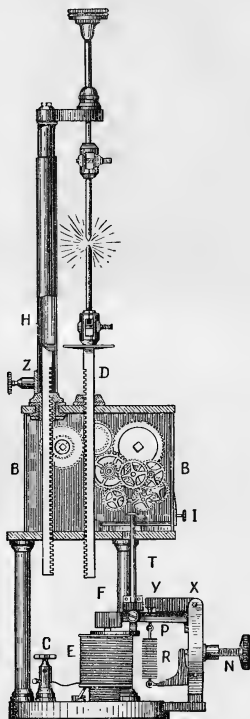


Рис. 24. Первый электрический светильник — дуговая лампа с регулирующим устройством

¹ Машины постоянного тока с последовательным возбуждением и донныне оказываются незаменимыми для электротяги.

² М. О. Доливо-Добровольский, Избранные соч., Госэнергоиздат, 1952, стр. 126.



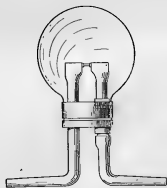
А. Н. Лодыгин

опыты и с накаливанием металлов и впоследствии, вернувшись к ним, стал изобретателем лампы с вольфрамовой нитью). Уголь давал яркий свет, как показали опыты уличного освещения в Песках в Петербурге. По свидетельству очевидца, «освещение своей яркостью привлекало внимание многочисленной публики, сравнивающей электрическое освещение с керосиновым». Однако уголь окисляется и быстро сгорает. Для повышения долговечности ламп Лодыгин помещал в баллон герметически закупоренные два угля, сгоравшие последовательно: если первый сгорал за полчаса, второй уже за два часа. Но этого, конечно, было недостаточно. Лодыгин пришёл к мысли откачки воздуха из баллона. Это улучшило качество лампы. В ноябре 1874 г. Академия наук присудила Лодыгину за его изобретение Ломоносовскую премию. Но средств для дальнейшей ра-

боты по улучшению качества лампы у изобретателя было недостаточно.

В этом отношении несоизмеримо больше было возможностей у американского изобретателя Эдисона, в деле которого участвовали такие «тузы», как Морган. Эдисон располагал ртутными насосами, более совершенными, чем насосы Лодыгина. Его агенты искали по всему свету подходящего материала для угля. Ему удалось довести до практических применений долговечности лампу накаливания. Лампа Эдисона появилась в 1879 г. Почти одновременно появилась лампа английского изобретателя Свана, который, по свидетельству его соотечественника и современника Троттера, «был настолько хорошо осведомлен о лампах Лодыгина, что не думал, что на его лампы с угольной нитью можно получить патент».

Однако в 70-х годах первый путь получения электрического освещения не казался правильным. Чиколев прямо называл направление использования эффекта накаливания ложным. П. Н. Яблочков, который сам был изобретателем каолиновой лампы накаливания, опередившей на 10 лет лампу Нернста, хотя и относился к опытам Лодыгина с большим уважением, однако направил свои усилия на использование дуги Петрова. Попытки использовать эту дугу для целей электрического освещения начались уже давно. Мысль изобретателей направлялась на борьбу с гашением дуги, вследствие увеличения расстояния между углями по мере их сгорания, которое вдобавок происходило неравномерно. Разрабатывались конструкции автоматических регуляторов (Фуко, Чиколев), имевших назначение поддерживать постоянным расстояние между углями. Однако регуляторы не обеспечивали надёжного горения дуги. Самому Яблочкову пришлось однажды во время следования царского поезда в

Рис. 25.
Лампа Лодыгина

Крым обеспечивать горение дугового прожектора на паровозе собственноручным регулированием дуги, хотя прожектор и был снабжен автоматическим регулятором Фуко.

Размышляя над проблемой регулирования, Яблочков нашёл простое, изящное решение задачи, расположив угли вертикально, параллельно друг другу. Так возникла знаменитая свеча Яблочкова (1876), под знаменем которой он, по выражению Чиколева, «неутомимой энергией, настойчивостью, последовательностью поднял за уши электрическое освещение и поставил его на подобающий ему пьедестал». Но дело не только в том, что свеча Яблочкова, которую изобретатель непрерывно совершенствовал, в течение двух десятилетий совершала триумфальное шествие по странам Европы и Азии, привлекая всеобщее внимание к электрическому освещению, но и в том, что в процессе работы над ней Яблочков решил ряд важнейших проблем электротехники. Прежде всего Яблочков для обеспечения равномерного сгорания углей перешёл на переменный ток. По его



П. Н. Яблочков

заказу, по его мысли, при его непосредственном участии Грамм в 1877 г. изготовил динамо-машину переменного тока. Это было смелое решение, так как переменный ток в то время совершенно не был изучен. Разделив кольцевую обмотку якоря на несколько секторов, не связанных друг с другом, Яблочков нагружал каждую обмотку на отдельные группы свечей и тем решил задачу дробления энергии. Таким образом машина Грамма — Яблочкова по существу была первым генератором многофазного тока. Правда, отдельные фазы были еще независимы друг от друга.

Но Яблочков пошёл дальше. В поисках путей рационального дробления энергии он пришёл к изобретению трансформатора. «Это изобретение, — пишет Яблочков, — имеет целью расположение токов для получения электрического света, которое позволяет включать в цепи, питаемой от одного источника тока, произвольное число светильников как



Рис. 26. Фонарь со свечой Яблочкова

одинаковой, так и различной силы света, и которое позволяет вдобавок менять силу света светильников. В любой точке цепи я включаю индуктирующую катушку, через которую проходит ток от источника тока. Далее я помещаю надлежащим образом вторую катушку, в которой первая индуктирует ток. Оба конца этой второй катушки соединяются проводом, образуя цепь, совершенно отдельную от первой. В неё включаются светильники в числе одного или нескольких». (Из французского патента Яблочкова № 115793 от 30 ноября 1876 г.)

В 1882 г. на промышленной выставке в Москве демонстрировался трансформатор лаборанта Московского университета И. Ф. Усагина (1855—1919). Это был трансформатор с разомкнутой цепью такого же типа, как



Рис. 26а. Освещение свечами Яблочкова моста через Темзу в Лондоне

и у Яблочкова. Яблочков был также первым, применившим конденсатор в цепи переменного тока. Он его использовал для решения той же проблемы дробления энергии. При этом Яблочков констатировал увеличение силы тока в отдельной ветви, особенно при наличии в цепях катушек, по сравнению с общим током. Так как законы переменного тока в то время не были известны, то это увеличение Яблочков отнёс за счёт атмосферного электричества. На самом же деле в своих экспериментах Яблочков пришел к резонанс-трансформатору.

Таким образом, П. Н. Яблочков явился зачинателем новой отрасли техники — техники переменного тока.

Новому течению нелегко было пробивать дорогу. Техника постоянного тока, имевшая ряд важных преимуществ, о которых мы сказали выше словами Доливо-Добровольского, интенсивно развивалась, организовались капиталистические фирмы, производящие аппаратуру постоянного тока (в том числе и компания Эдисона), которые враждебно относились к переменному току. Так компания Эдисона скупала патенты на трансформаторы

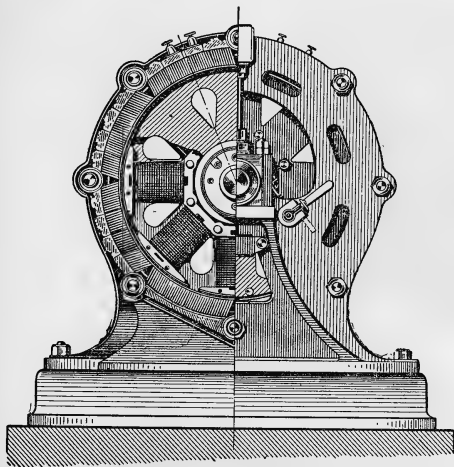


Рис. 27. Генератор переменного тока Грамма

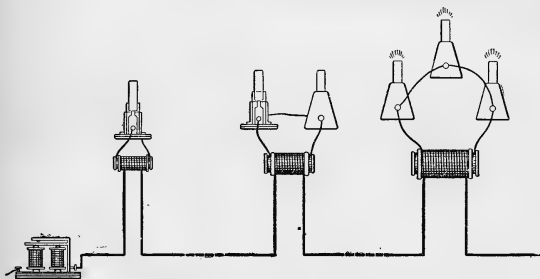


Рис. 28. Дробление электрической энергии по П. Н. Яблочкову



М. О. Доливо-Добровольский

(с замкнутой цепью) Дери — Блати — Циперновского с тем, чтобы «положить их на полку». Вместе с тем в активе постоянного тока значатся компаунд-машина (1879), трёхпроводная система (1880), развитие электрического трамвая (контроллер для управления 1885 г., контактная дуга 1887 г.), аккумуляторы, которые начала производить английская «Электрическая компания аккумуляторов». До 1891 г. строились электростанции только постоянного тока.

Однако изучение переменного тока и его возможностей продолжалось. В 1885 г. Дери, Блати и Циперновский взяли патент на трансформатор с замкнутой магнитной цепью, о котором мы говорили выше. Открываются механические действия переменного тока (Элиу Томсон, 1884). В 1885 г. Феррарис открывает принцип вращающегося поля. Хорват Никола Тесла в 1887 г. изобретает мотор двухфазного

тока. Но победа переменного тока была обеспечена неутомимой деятельностью Михаила Осиповича Доливо-Добровольского (1862 — 1919), который решил задачу экономической передачи энергии на большие расстояния. М. О. Доливо-Добровольский — отец трёхфазного тока. Он открыл, что с помощью трёхфазного тока можно получить вращающееся магнитное поле, и построил первый асинхронный мотор. Этим открытием Доливо-Добровольский произвёл подлинную техническую революцию. Переменный ток, вопреки предсказаниям «скептиков», за которыми, как мы увидим ниже, нередко стояли капиталистические конкуренты, можно было заставить производить механическую работу простым, дешёвым и удобным способом.

Преодолевая косность одних, яростное сопротивление других, Доливо-Добровольский неустанно работает над проблемой трёхфазного тока. Он конструирует генератор трёхфазного тока, трансформатор трёхфазного тока и своей работой доказывает преимущества трёхфазного тока. Эти преимущества: 1) экономическая передача и на большие расстояния и 2) превосходные качества электродвигателей.

В 1891 г. М. О. Доливо-Добровольский осуществил первую в мире электропередачу трёхфазным током. Энергия водяной турбины в г. Лауфен была передана на расстояние 175 км в г. Франкфурт-на-Майне. Передавалась мощность в 200 квт при напряжении в 12,5 кв с к. п. д. 77,4%. Эта мощность на приёмной станции преобразовывалась в мощность низкого напряжения (95 в) и распределялась по асинхронным двигателям

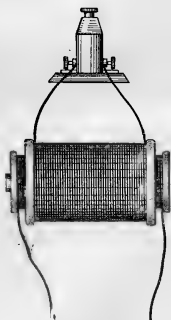


Рис. 29. Питание свечи Яблочкова от трансформатора

и осветительным установкам. Передача получила высокую оценку комиссии, возглавляемой Г. Гельмгольцем. 1891 год стал годом признания трёхфазного тока, годом рождения новой электротехники, перерастающей рамки капиталистического общества.

«Электрическая выставка 1891 г. во Франкфурте-на-Майне, — говорил в своём докладе на I Всероссийском электротехническом съезде 28 декабря 1899 г. Доливо-Добровольский, — была важна в истории электротехники тем, что на ней впервые выступил публично, как новая система, трёхфазный ток».

«... Трёхфазный ток стал современным культурным фактором; благотворное влияние, которое оказывает электротехника на жизнь западных народов, не замедлит обнаружиться и у нас на Руси».

«... Целью моего доклада было показать, как тесно связан последний прогресс электротехники с развитием системы трёхфазного тока».

«... Легко видеть, к чему пригодна эта система и с каким вооружением электротехника переступает порог нового столетия»¹.

Необходимо отметить, что Доливо-Добровольский, открыв эру трёхфазного тока с её богатыми возможностями и решив таким образом проблему передачи энергии на расстояние, видел и ограниченность этого способа передачи. В докладе «О границах применения переменных токов для передачи энергии на большие расстояния» он говорил:

«Я ставлю вопрос о том: останется ли система трёхфазного тока высокого напряжения для будущих электропередач единственно приемлемой. Другими словами: стоим ли мы на правильном пути, останется ли нам только совершенствовать детали и увеличивать размеры, чтобы «завоевать мир»?

Думаю нет. Я ожидаю, напротив, нового возобновления борьбы между переменным и постоянным током. Я вижу возможность реванша для постоянного тока, который многому научится у техники переменного тока».

Новатор мечтает о дальних передачах, эпоха которых принадлежит коммунистическому обществу. «Будет ли при столь беспримерном развитии нашей отрасли техники утопией или фантазией назвать цифры в 500 км или 1500». Далее «... нужно изыскать значительные источники водной энергии, если даже и не всегда там, где они могут быть непосредственно использованы»².

Передовая техническая мысль опережала возможности капиталистического строя. Она подтверждала пророчество Энгельса, высказанное им в связи с опытом Дебре, что оплодотворённые электротехникой производи-

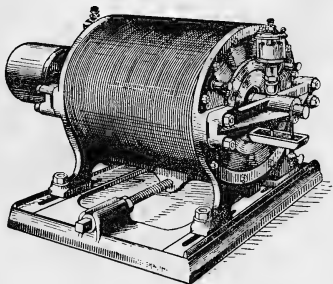


Рис. 30. Электродвигатель двухфазного тока
Н. Тесла

¹ М. О. Доливо-Добровольский, Избранные соч., стр. 75 и 123.

² Там же, стр. 189—190.

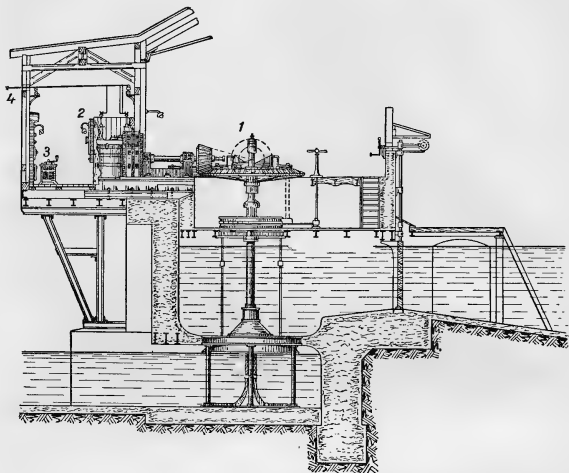


Рис. 31. Схема устройства первой гидроэлектростанции в Лауфене (Германия):

1 — турбина в 300 л. с.; 2 — генератор переменного тока; 3 — трансформатор; 4 — передаточный провод

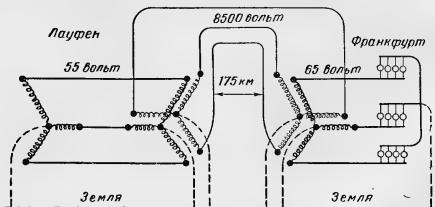


Рис. 31а. Схема первой линии передачи электрической энергии из Лауфена во Франкфурт

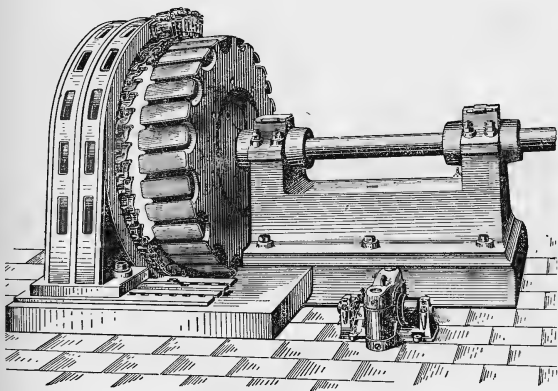


Рис. 32. Генератор трёхфазного тока

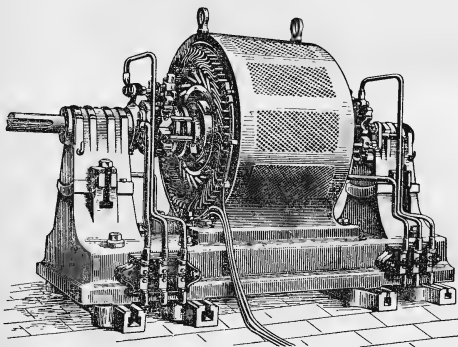


Рис. 33. Двигатель трёхфазного тока М. О. Доливо-Добровольского на 100 л. с.

тельные силы неизбежно перерастут рамки капитализма, перерастут руководство буржуазии.

Когда в России порвалась цепь капитализма, то основатель первого в мире социалистического государства рабочих и крестьян В. И. Ленин провозгласил: «Коммунизм — это советская власть плюс электрификация всей страны». Показательно, что именно в СССР была пущена 27 июня 1954 г. первая в мире электростанция, работающая на атомной энергии. Капитализм продемонстрировал миру атомную энергию в зверином облике войны, социализм поставил её на службу мирному труду.

Нельзя не отметить в заключение важную, в ряде случаев решающую роль русской научной мысли в развитии электротехники. Об этом, в частности, говорил 27 декабря 1899 г. на открытии съезда электротехников в Петербурге выдающийся русский учёный, председатель Русского технического общества профессор Николай Павлович Петров. Приведём изложение его речи в статье, напечатанной в «Записках Московского отделения имп. Русск. техн. о-ва» за 1899 г. (№ 9—10): «С электричеством мы стали знакомиться со времён Ломоносова, и мы с гордостью можем сказать,

что Россия и русские люди внесли уже крупные вклады и дали сильные темпы развитию электротехники. Обращаясь к именам русских деятелей на этом поприще, отметим Петрова, профессора Медицинской акаде-

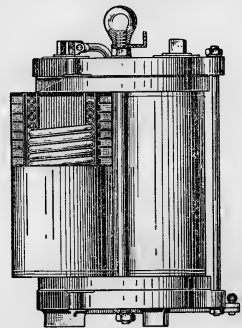


Рис. 34. Трансформатор трёхфазного тока М. О. Доливо-Добровольского

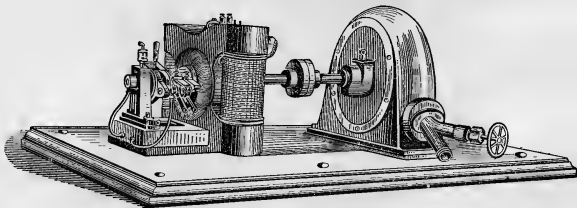


Рис. 34а. Один из первых турбогенераторов

мии, который ещё раньше Дэви описал вольтову дугу, ясно указав её применение к освещению. Барон Шиллинг первый достиг практического применения электричества к телеграфированию. Член Академии наук Якоби первый предложил гальванопластику, получившую впоследствии столь широкое применение; он же первый построил электродвигатель.

П. Н. Яблочков дал сильный толчок применению электричества к освещению, предложив свою свечу, благодаря которой он вынес вольтовую дугу из стен физических кабинетов на улицы Лондона и Парижа и осветил их с небывалой яркостью. Эта свеча дала электротехнике такой же сильный толчок, какой в своё время дала паровая машина Уатта применению пара в промышленности. Он же с 1878 г. изобрёл трансформатор электрического тока, что дало возможность пользоваться силой водопадов, превращая их энергию в электрическую для превращения её в свет, теплоту и механическую работу, сосредоточенную в какой-нибудь машине или раздроблённую на множество малых машин.

М. О. Доливо-Добровольский не только оценил всю пользу трансформаторов, но он первый устроил сильный электродвигатель с трёхфазным током и первый устроил передачу тока на огромное расстояние в 175 км и посредством этого тока превращал энергию водопада для освещения франкфуртской выставки.

Затем идут имена: Лодыгина — первая идея ламп накаливания, Чиколева — устройство дифференциальных ламп, Бенардоса — спаивание металлов и Попова — телеграфирование без проводов. Таковы услуги, оказанные русскими деятелями на поприще электротехники¹.

Справка Н. П. Петрова — лучший ответ тем, кто принижал достоинство русской научной мысли.

Итоги.

В нашем очерке мы не могли коснуться всех сторон развития техники в рассматриваемый период, но из сказанного ясно, как далеко шагнула техника за последнее тридцатилетие. Не означает ли этот бурный прогресс техники, что капитализм всё ещё представлял собой прогрессивный общественный строй, способствующий росту производительных сил? Нет, не означает. Более того, этот рост техники в условиях сохранения капиталистической системы является одним из факторов, усиливающих неравномерность развития капитализма, способствующего его загниванию.

Небывалое развитие техники является одним из условий, облегчающих дело скачкообразного вытеснения одних стран другими. Капиталистические страны догоняют и перегоняют друг друга в экономическом развитии, лихорадочно конкурируют между собой, стремятся занять господствующее положение в мировой экономике. Если начало периода отмечается ещё экономическим преобладанием старейшей капиталистической страны — Англии, то к концу периода картина резко меняется, выдвигаются молодые капиталистические страны: США, Германия, Япония. Ещё в 1870 г. на долю Англии приходилось 51,5% всего мирового производства угля и 50% чугуна, в то время как на долю США приходилось соответственно 15,4% и 14%, а на долю Германии 15,8% и 10,4%. Но уже к 1900 г. на первое место выходят США, доля мирового производства угля которых составляет 32,5%, а чугуна 32%. Англия ещё опережает Германию; её доля производства угля 29,7%, чугуна 22,1%, но Германия уже заметно приближается к своей сопернице (18,9% производства угля и 17,6% чугуна). А к началу первой мировой войны по производству чугуна Германия опережает Англию (21,3% Германия и 13,2% Англия) и почти догоняет по углю (21,8% Англия и 21,3% Германия). «Неравномерность экономического и политического развития есть безусловный закон капитализма»².

¹ А. Соломка, Судьба русских открытий, журн. «Вестник опытной физики и элементарной математики», 1900, стр. 49–50.

² В. И. Ленин, Соч., т. 21, стр. 311.

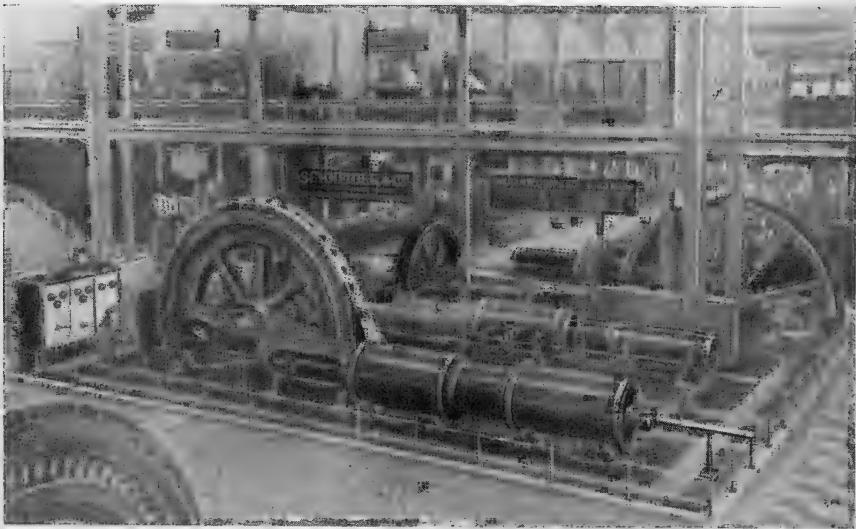


Рис. 35. Паровая машина трёхкратного расширения 1700 л. с. на Всемирной Парижской выставке 1900 г.

Таким образом, развитие техники способствует загниванию капитализма, углублению его противоречий, обострению конфликта между производительными силами и производственными отношениями. Антагонизм между общественным характером производства и частной собственностью на средства и продукты производства обостряется с небывалой силой. Само развитие техники несёт в себе черты этих противоречий. Техническая мысль подчиняется капиталистическому «профиту». «В деле науки он (т. е. буржуа), — писал в 1880 г. Салтыков-Щедрин, — ценит только прикладные знания, нагло игнорируя всю подготовительную теоретическую работу и предоставляя исследователям истины отыскивать её на собственный риск». Капиталист ценит именно те «прикладные знания», которые могут обеспечить ему барыш сейчас же, немедленно. Он маринует, бракует важные изобретения, если они противоречат его интересам.

Этот момент профита хорошо изображён на картине русского художника Владимирова: «Изобретатель и капиталист». Художник изобразил творческий порыв изобретателя и холодный расчёт дельца, которого мало интересует творчество, а только возможная выгода от изобретения. В результате техника развивается дисгармонично, отражая все черты звериной капиталистической конкуренции. Вспомним хотя бы эпизоды борьбы переменного и постоянного тока. Доливо-Добровольский рассказывает: «В сентябре 1889 г. Эдисон посетил Берлин. При сделанном ему предложении осмотреть новый электродвигатель он буквально замахал руками: «Нет, нет, переменный ток — это вздор, не имеющий будущего. Я не только не хочу осматривать двигатель переменного тока, но и слышать о нём. И он не пришел!»

Этот пример — не только иллюстрация борьбы старого и нового в науке. В капиталистическом мире эта борьба — чаще всего проявление капиталистической конкуренции, войны всех против всех. Ведь Эдисон был участником крупной электротехнической фирмы, производящей машины и аппаратуру постоянного тока. Выше мы говорили, как эта фирма «заморозила» патенты на трансформаторы. О закулисной борьбе конкурентов свидетельствует другое замечание Доливо-Добровольского, в котором он говорит, что в 80-х годах его доклад против противников переменного тока не был допущен «из соображений интересов дружественной фирмы», т. е. фирмы, находящейся в союзе с компанией AEG, на службе которой находился Добровольский. В условиях капитализма, звериной капиталистической конкуренции, как указывал В. И. Ленин, «усиленно быстрый рост техники несёт с собой все больше элементов несоответствия между различными сторонами народного хозяйства, хаотичности, кризисов» (Соч., т. 22, стр. 197).

Перерастание «свободного» капитализма в монополистический ещё более усиливает эту дисгармонию. Монополизируется производство, монополизируется наука и техника. Показательно, что именно в такой передовой отрасли техники, как электротехника, особенно ярко отразилась капиталистическая конкуренция, ведущая к монополии, к разделению сфер влияния, к опережению молодыми странами более могучих.

В Германии старейшая электротехническая фирма Сименс и Гальске возникла ещё на заре электротехники, в 1850 г. Она производила динамомашин, электроизмерительную аппаратуру, электромоторы, лампы и т. д. К концу века фирма стала крупнейшим капиталистическим предприятием. В 1873 г. в Нюрнберге была основана фирма Шуккерта, специализирующаяся на выпуске динамо-машин, дуговых ламп и измерительных приборов. В 1880 г. в Германии образовалось «Германское эдисоновское об-

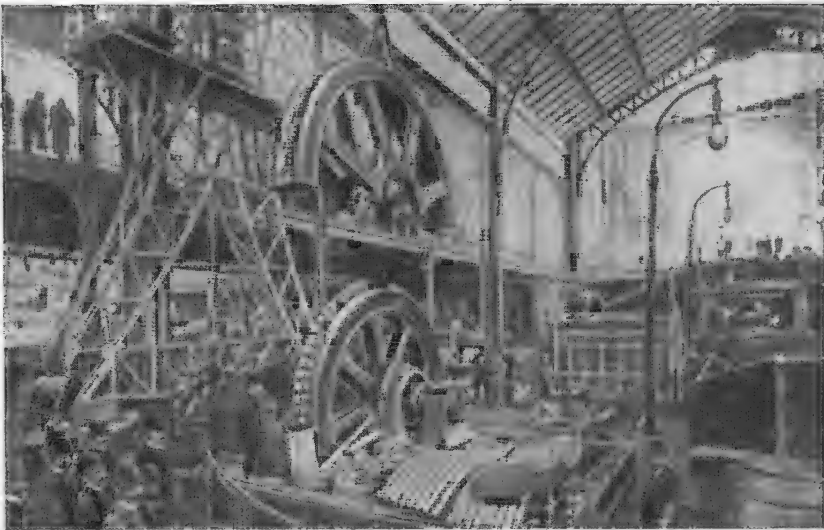


Рис. 36. Монтаж генератора трёхфазного тока на Всемирной Парижской выставке 1900 г.

щество», ставшее потом «Всеобщей компанией электричества» (AEG), которое привлекло в германскую электротехническую промышленность капитал в 5 млн. марок.

Из канатной фабрики Фельтена и Гильома выросло крупнейшее предприятие по производству электрических кабелей и проводов.

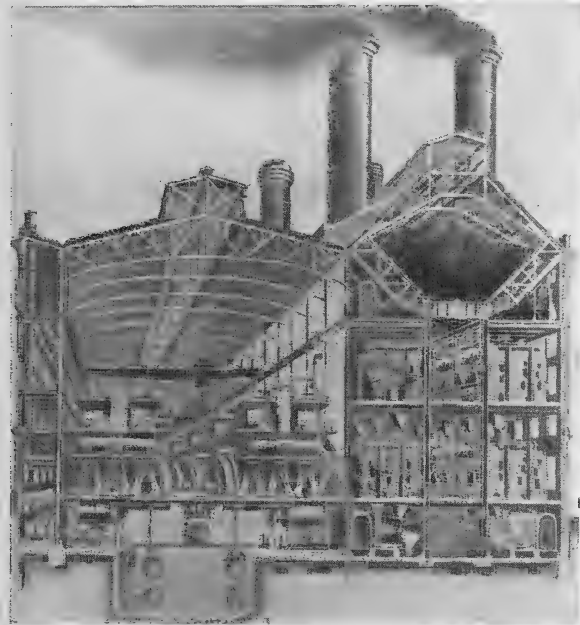


Рис. 37. Разрез электростанции конца XIX в.

Электроизмерительную аппаратуру поставляла фирма Гартмана в Вюрцбурге. Впоследствии завод фирмы был переведён во Франкфурт-на-Майне, а фирма преобразовалась в фирму Гартман и Браун. Все эти фирмы явились крупнейшими электротехническими предприятиями Германии, распространяющими свою деятельность далеко за её пределами. В области электротехники Германия обогнала Англию. Наряду с крупными фирмами Сименс и Гальске, Шуккерт и К^о, AEG возникали специализированные предприя-

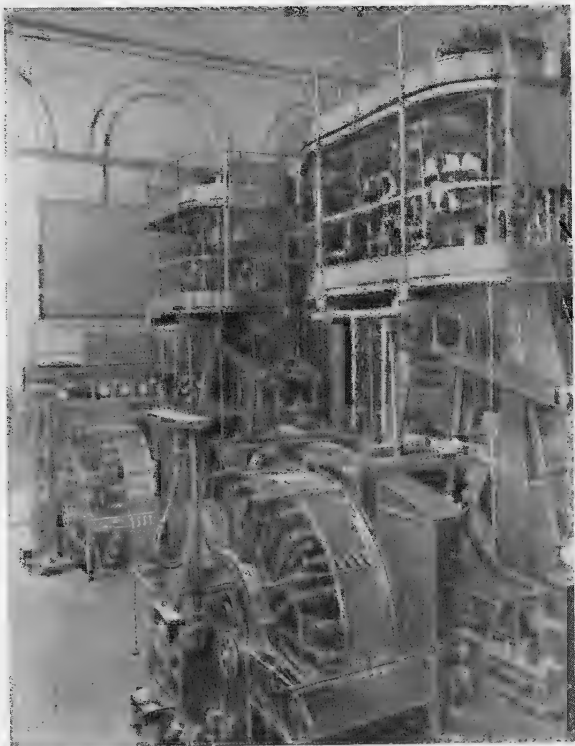


Рис. 37а. Мощные паровые машины с генераторами трёхфазного тока

тия. В 1885 г. был основан завод динамо-машин «Дейчен электрицитетсверке» в Аахене, в 1890 г. образовалось общество Ламейер и К^о для производства динамо-машин и трансформаторов и аналогичное предприятие Куммера в Дрездене.

Англия в начале 80-х годов переживала полосу «электрической лихорадки». В электротехнику привлекались капиталы, скупались патенты,

образовывались компании. Опасаясь отлива капиталов из старых промышленных предприятий Англии, парламент в 1882 г. принял ограничительный акт на электрические концессии. Новые компании лопнули. В области производства электрической, телефонной и силовой аппаратуры Англия оказалась позади Германии. Она сохранила свои позиции в деле производства точной измерительной аппаратуры, отличающейся высоким качеством кабелей, аккумуляторов. В 80—90-х годах известностью пользовались английские фирмы «Элиот Бразерс», «Бреш и К^о», «Электрик констрейшен К^о» и др.

Наибольший размах новая отрасль техники получила в США. Американцы не обогащали электротехнику новыми идеями и открытиями. Они

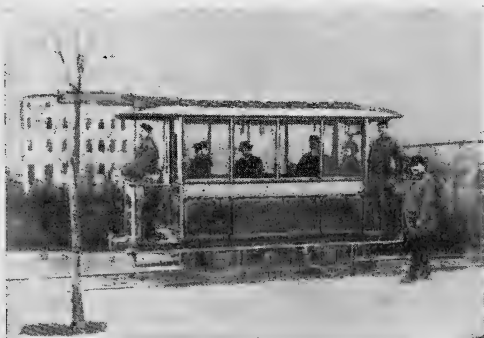


Рис. 38. Один из первых электрических трамваев

заимствовали их в Европе. Но бурно развивающийся американский капитализм вкладывал огромные капиталы в электротехнику, организуя массовое производство электротехнической аппаратуры. В 1894 г. в США было около 3 тыс. центральных электрических станций, около 2500 частных установок для освещения дугowymi лампами и около 5 тыс. частных установок для освещения лампами накаливания. Кроме того, насчитывалось около тысячи электрических железных дорог. Всего в 1894 г. было вложено в электротехническую промышленность свыше полутора миллиарда рублей. При этом чрезвычайно отчётливо проявились монополистические тенденции. Так, все телеграфы сконцентрировались в руках «Вестерн Унион и К^о». В области техники сильных токов в 80-х годах преобладала фирма «Бреш Электрик К^о», производившая дуговые лампы.

Затем верх взяла компания Эдисона. Возникшая в дальнейшем фирма Томсон-Хаустон сливается с фирмой Бреша, поглощая последнюю. В свою очередь компания Эдисона поглощает компанию электрических дорог Скрага. Вскоре в дело строительства электрических железных дорог включилась фирма Томсон-Хаустон, успешно конкурируя с фирмой Эдисона. Борьба закончилась тем, что в 1892 г. объединились обе фирмы и,

поглотив еще несколько компаний, образовали компанию «Дженерал Электрик».

Как обстояло дело дальше, узнаём из книги В. И. Ленина «Империализм, как высшая стадия капитализма».

«Электрическая промышленность — самая типичная для новейших успехов техники, для капитализма конца XIX и начала XX века. И всего более развилась она в двух наиболее передовых из новых капиталистических стран, Соединенных Штатах и Германии. В Германии на рост концентрации в этой отрасли особо сильное влияние оказал кризис 1900 г. Банки, к тому времени достаточно уже сросшиеся с промышленностью, в высшей степени ускорили и углубили во время этого кризиса гибель сравнительно мелких предприятий, их поглощение крупными ...

В результате концентрация после 1900 года пошла вперед гигантскими шагами. До 1900 года было восемь или семь «групп» в электрической промышленности, причем каждая состояла из нескольких обществ (всего их было 28) и за каждой стояло от 2 до 11 банков. К 1908—1912 гг. все эти группы слились в две или одну. Вот как шёл этот процесс.

Группы в электрической промышленности

До 1900 г.	Фельтен Ламейер и Гильом	Унион AEG	Сименс и Гальске	Шукерт и К ^о	Бергман	Куммер
	Фельтен и Ламейер	AEG (Вс. электр. об-во)	Сименс и Гальске-Шукерт		Бергман	Крахнула в 1900
к 1912	AEG (Вс. электр. об-во)		Сименс и Гальске-Шукерт			
(Тесная «кооперация» с 1908 года)						

Знаменитое AEG (Всеобщее общество электричества), возросшее таким образом, господствует над 175—200 обществ (по системе «участий») и распоряжается общей суммой капитала в 1¹/₂ миллиарда марок. Одних только прямых заграничных представительств оно имеет 34, из них 12 акционерных обществ, — больше чем в 10 государствах. Ещё в 1904 г. считали, что капиталы, вложенные немецкой электрической промышленностью за границей, составляли 233 миллиона марок, из них 62 милл. в России. Нечего и говорить, что «Всеобщее общество электричества» представляет из себя гигантское «комбинированное» предприятие с производством — число одних только фабрикационных обществ у него равняется 16 — самых различных продуктов от кабелей и изоляторов до автомобилей и летательных аппаратов.

Но концентрация в Европе была также составной частью процесса концентрации в Америке. Вот как шло дело.

Америка	Всеобщая электр. К ^о (General Electric C ^o)	
	К ^о Томпсон-Гаустон основывает для Европы фирму	К ^о Эдисона основывает для Европы фирму «Французская К ^о Эдисона», которая передает патенты немецкой фирме
Германия	«Унион К ^о Электричества»	«Вс. об-во эл.» 'А. Е. Г.)
«Вс. об-во эл.» (А. Е. Г.)		

Таким образом сложились две электрические «державы»: «других, вполне независимых от них электрических обществ на земле нет», — пишет Гейнинг в своей статье «Путь электрического треста». О размере оборотов и величине предприятий обоих «трестов» некоторое, далеко не полное представление дают следующие цифры:

	Оборот товаров (милл. марок)	Число служащих	Чистая прибыль (милл. марок)
Америка: «Вс. эл. К ^о » (G. E. S.)	1907 : 252 1910 : 298	28 000 32 000	35,4 45,6
Германия: «Вс. об-во эл.». (A. E. G.)	1907 : 216 1911 : 362	30 700 60 800	14,5 21,7

И вот в 1907 г. между американским и германским трестом заключен договор о дележе мира. Конкуренция устраняется. «Вс. эл. К^о» (G. E. S.)



Рис. 39—40. Электропоезд на Парижской выставке 1881 г.

«получает» Соединенные Штаты и Канаду. «Вс. об-ву эл.» (A. E. G.) «достается» Германия, Австрия, Россия, Голландия, Дания, Швейцария, Турция, Балканы. Особые — разумеется, тайные — договоры заключены относительно «обществ — дочерей», проникающих в новые отрасли промышленности и в «новые», формально еще не поделенные страны¹.

Вот, следовательно, как новая отрасль техники ускорила процесс монополизации, что в свою очередь ведёт к монополизации науки.

¹ В. И. Ленин, Соч., т. 22, стр. 234—235.

«Конкуренция превращается в монополию. Получается гигантский процесс обобществления производства. В частности обобществляется и процесс технических изобретений и усовершенствований»¹.

В. И. Ленин приводит выдержки из отчёта американской комиссии о трестах, касающиеся этого процесса монополизации техники: «И другие тресты держат у себя на службе так называемых *«developping engineers»* (инженеров для развития техники), задачей которых является изобретать новые приёмы производства и испытывать технические улучшения. Стальной трест платит своим инженерам и рабочим высокие премии за изобретения, способные повысить технику или уменьшить издержки»².

Капиталистические фирмы покупают не только инженеров и техников. Они берут на службу физиков и химиков, механиков и математиков. При крупнейших производствах организуются лаборатории и научно-исследовательские институты, работающие в конечном счёте не столько в интересах науки, сколько в интересах капиталистов, не останавливающихся перед навязыванием науке античеловеческих, разрушительных задач. С периодом «свободного» капитализма кончается и период «свободного» развития науки.

¹ В. И. Ленин, Соч., т. 22, стр. 193.

² Там же, стр. 192.

ФИЗИКА ПЕРИОДА 1870—1900 гг.

**Новые черты
в развитии физики.**

С 70-х годов в развитии физики явственно выступают новые черты, качественно отличающие это развитие от предыдущего периода. Это прежде всего усиление связи физики с техникой, с производством. Хотя производство всегда играло важную и решающую роль в развитии физики, но оно никогда ещё так глубоко не пронизывало внутреннюю историю её развития, как это произошло с указанного периода.

Чем дальше отходило капиталистическое производство от своей ремесленной феодальной основы, тем всё больше и больше нуждалось оно в науке. Хорошо известно, например, что разгадка секрета изготовления старинных булатов удалась Аносову именно потому, что он искал решения этой задачи на путях научного эксперимента, смело применив такой инструмент, как микроскоп, для исследования металла. Здесь был по существу первый опыт создания заводской лаборатории, идущей на смену старым цеховым секретам.

Особенно важную роль в деле проникновения науки непосредственно на производство сыграла новая бурно развивающаяся отрасль техники — электротехника. Решение такой сложной технической задачи, как телеграфирование по трансатлантическому кабелю, было бы невозможно без помощи физиков. В электротехнике задачи техника и исследователя сливались — тем и другим приходилось искать новых путей. Ведущие физики живо интересовались проблемами электрического освещения, дробления энергии, её канализации и т. д., так же, как ведущие инженеры-электрики вынуждены были интересоваться законами электромагнитных процессов, проблемами электрических измерений и т. п. Всё это приводило к взаимному обогащению науки и техники. Техника доставила физику новые, более совершенные, чем прежде, средства для экспериментирования, но вместе с тем поставила перед ним такие задачи, которые нельзя было решать прежними методами работы физика.

**Развитие
лабораторий
и институтов.**

В прошлом физик работал в одиночку и обходился крайне простыми средствами. Вспомним арсенал Фарадея: мотки проволоки, куски железа, магнитные стрелки. Вспомним также, что Фарадей не создал так называемой школы. Ньютон и знаменитый астроном Гершель сами мастерили свои рефлекторы, сами полировали зеркала. Такое положение вещей сохранялось до 70-х годов. Дж. Дж. Томсон вспоминал в 1931 г., что в Англии 60—70-х годов по существу не было физических лабораторий, лабораторией В. Томсона была крохотная комната по соседству с угольным подвалом, Джоуль делал свои знаменитые опыты у себя на дому в Манчестере, Стокс производил свои оптические эксперименты в Кембридже, в той же обстановке, что и Ньютон за 150 лет с лишним до него.

Теперь обстановка изменилась. Наука нужна промышленности до зарезу. В обстановке ожесточённой капиталистической конкуренции нельзя было дожидаться результатов деятельности отдельных, пусть даже гениаль-

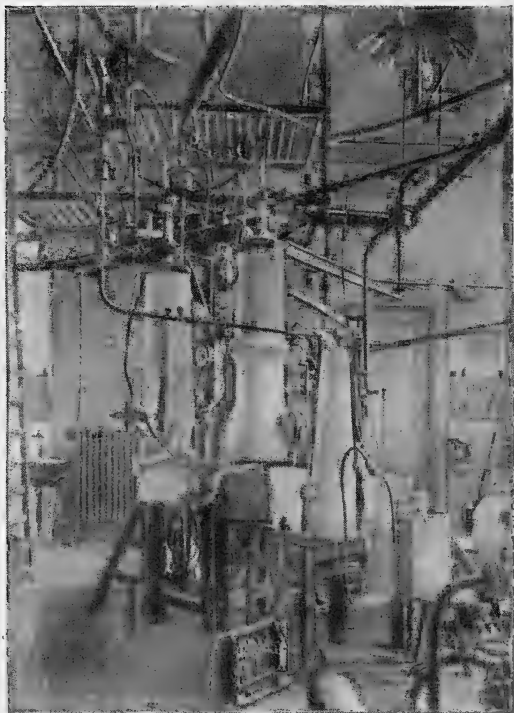


Рис. 41. Лаборатория низких температур Камерлинг-Оннеса в Лейдене (Голландия)

ных лиц. Нужны были новые формы организации науки, новые темпы её развития. На смену одиночкам приходят школы, на смену частным домашним лабораториям крупные лаборатории и институты, на смену кустарным

мастерским мощные предприятия, изготовляющие научную аппаратуру. «С тех пор, как открыт спектральный анализ и настало новое движение в электротехнике, на физику особенно не жалеют денег», — указывал Столетов. «Так возникли и возникают в Западной Европе и Америке одно за другим богатые здания, приспособленные для преподавания и для исследований»¹. Указывая на это важное обстоятельство в своём докладе «Физические лаборатории у нас и за границей», Столетов совершенно справедливо бьёт тревогу по поводу отставания России от того нового, что так ясно обозначилось в развитии физической науки. Столетов указывает, что в России



Рис. 42. Термическая лаборатория В. Ф. Лугинина в Московском университете

нет физических институтов: «нет во всей России ни одного здания, которое было построено собственно для физики, несмотря на то что русские учёные делали всё возможное, чтобы обеспечить достойное развитие науки; нельзя ограничиться «сохранением существующего, ибо это значит остановиться, т. е. остаться назади». «Такое положение дел, — указывал Н. А. Умов, подхвативший после смерти Столетова знамя борьбы за организацию физических институтов в России, — не согласное ни с обязанностями, ни с достоинством русской науки, должно окончиться»².

Борьба А. Г. Столетова, Н. А. Умова, П. Н. Лебедева за развитие передовой, а не отстающей русской физики сливалась с борьбой русского народа за ликвидацию пут, сковывающих его свободное развитие. До какой остроты доходила эта борьба, можно судить по тому факту, что Умов и Лебедев были вынуждены уйти из института, на создание которого ушла жизнь Столетова и их самих. Об этом мы будем еще говорить в своем месте.

¹ А. Г. Столетов, Собрание соч., т. II, Гостехиздат, 1948, стр. 203.

² Н. А. Умов, Собрание соч., т. III, СПб., 1916, стр. 578.

Столетов остро и чутко понимал новые требования, предъявляемые жизнью к физике, и необходимость создания новых условий её развития.

Начиная с 70-х годов, идёт усиленное строительство физических институтов в Западной Европе и Америке. Возникают такие учреждения, как лаборатория Кэвендиша в Кембридже, физико-технический институт в Берлине, физические институты в Страсбурге, в Вене и т. д.



Рис. 43. Учебная лаборатория конца XIX в.

Во главе институтов становятся ведущие физики: Максвелл, Гельмгольц, Больцман, Кундт и другие. Растёт приток капиталистических «пожертвований», т. е. отчислений доходов от грабежа с целью получения ещё больших доходов, на науку. В этом отношении на первом месте была старейшая капиталистическая страна Англия, которая за счёт ограбления колоний, в особенности Индии, могла щедрее, чем какая-либо другая страна, финансировать науку при помощи «частной» инициативы.

**Физика
и производство.**

Нередко эти жертвования носили типичный для английской буржуазии лицемерно-ханжеский характер и с тем же лицемерием принимались учёными. Приведём один пример.

В 1895 г. некий Годкинс завещал Лондонскому королевскому институту капитал 100 тыс. долларов, проценты с которого предназначались на «исследование связей и соотношений, существующих между человеком и его Создателем». Институт назначал эти средства на работы Дьюара в области низких температур, считая, что это наилучшим образом соответствует

воле жертвователя. Это позволило последнему получить наиболее совершенный вакуум. Какое значение это имело для науки и техники, можно судить по свидетельству Дж. Дж. Томсона.

«До начала настоящего столетия в нашем распоряжении были шпренглевские насосы, которые требовали, чтобы в течение многих часов поднимали и опускали сосуды с ртутью с тем, чтобы в конце концов получить с нашей теперешней точки зрения неважный результат. Зато получалось весьма живое представление о том, до какой степени природа боится пустоты.

Все это изменилось с тех пор, как сэр Джемс Дьюар выработал метод получения высокого вакуума при помощи угля, охлаждаемого жидким воздухом. Это был не только более быстрый и удобный способ получения вакуума, но и способ, дававший значительно более высокий вакуум, сделавший возможным опыты и измерения, которых нельзя было осуществить раньше. Этот новый метод получения вакуума революционизировал наши представления о строении материи. Если наука помогает промышленности, то и в свою очередь промышленность помогает науке. Иллюстрацией может служить то, что потребность в высоком вакууме для электрических и электронных ламп привела к тому, что получение высокого вакуума стало делом коммерческой выгоды, и в результате физик имеет в своём распоряжении насосы настолько большой мощности, что они могут поддерживать высокий вакуум, несмотря на то что в сосуд, где получается этот вакуум, непрерывно втекает поток тех частиц, которые мы желаем изучать. Это исключительно важно при изучении заряжённых частиц и электронов»¹.

Но это означает, что новые задачи, стоящие перед физикой, требуют больших средств и в условиях капитализма физику их неоткуда взять, как от капиталистов. Закабаление науки капиталом — одна из важнейших черт развития науки периода упадка капитализма. В период империализма мы имеем дело с прямым фактом монополизации науки и ликвидации последних остатков её относительной свободы, которой она еще пользовалась в эпоху домонополистического капитализма.

Этот пример интересен и как иллюстрация теснейшей взаимопроницающей связи науки и производства. Лампа накаливания, изобретённая А. Н. Лодыгиным, явилась в конечном счёте источником пробуждения «коммерческого интереса» к высокому вакууму, а это привело к крупнейшим открытиям в физике, подготовившим открытие атомной энергии.

Другим примером такого взаимопроникновения науки и производства является история возникновения оптической фирмы Цейсса в Германии. Вместе с тем это яркая страничка из истории социал-реформизма. Физик Эрнст Аббе, сын ткацкого мастера, получивший благодаря своим способностям среднее и высшее образование, тридцати лет от роду стал профессором кафедры теоретической физики в Иене. Выйдя из рабочей среды, Аббе тем не менее не пошёл по пути авангарда рабочего класса, это не было случайностью.

Период 1872—1904 гг. в истории Европы, как указывал Ленин в своей статье «Исторические судьбы учения Карла Маркса», «был периодом «мирной» подготовки к эпохе будущих преобразований». Ленин указывал, что в этот период «внутренне-сгнивший либерализм пробует оживить себя в виде социалистического *оппортунизма*. Период подготовки сил для великих битв они истолковывают в смысле отказа от битв. Улуч-

¹ А. К. Тимирязев, Жизнь и труды Дж. Дж. Томсона, журн. «Успехи химии», т. X, вып. 1, 1941, стр. 109—110.

шение положения рабов для борьбы против наемного рабства они разъясняют в смысле продажи рабами за пятак своих прав на свободу. Трусливо проповедуют «социальный мир» (т. е. мир с рабовладением), отречение от классовой борьбы и т. д. Среди социалистических парламентариев, разных чиновников рабочего движения и «сочувствующей» интеллигенции у них очень много сторонников»¹.

Вот таким сторонником «социального мира» и был Аббе. Свои реформистские иллюзии он стремился провести в жизнь. Вместе с университетским механиком К. Цейссом он организует оптические мастерские. Предприятие, построенное на хорошей научной основе, успешно развивалось. По инициативе Аббе возникает в Иене завод оптического стекла Шотта, для которого он в 1886 г. в сотрудничестве с Шоттом и Цейссом разработал новую усовершенствованную рецептуру. Новая техника, новые конструкции приборов принесли плоды, предприятия Аббе и Цейсса стало всемирно известной оптической фирмой. На прибыли фирмы был построен физический институт в Иене. После смерти Цейсса Аббе передал управление предприятием в руки совета из представителей университета, магистрата и рабочих. Буржуазные историки и писатели всячески расхваливали этот «союз науки и труда» как образец «социальной гармонии». Однако, как указывал Ленин ещё в 1913 г., «Бешеные вооружения и политика империализма делают из современной Европы такой «социальный мир», который больше всего похож на бочку с порохом». Фирма Цейсса вооружала армию Кайзера и армию Гитлера и тем самым принесла германскому рабочему классу, германскому народу не «социальный мир», а неслыханные страдания. Таков неизбежный итог оппортунизма, который гениально предвидел Ленин.

Существенно новым моментом в развитии физики является возникновение физических школ. Столетов и Лебедев в России, Гельмгольц, Кундт, Кирхгоф в Германии, лаборатория Кэвендиша в Англии являются пионерами в этой новой форме организации и развития физики. Фронт физической науки расширяется, причём этот процесс идёт параллельно с всё более и более узкой дифференциацией отдельных исследований и направлений. Законы капиталистической конкуренции отражаются и в развитии физики. Беззастенчивое присваивание приоритета, эксплуатация молодых неизвестных талантов, поощрение тех исследований, которые сулят принести немедленную прибыль и забвение других важных для науки направлений, травля передовых учёных — всё это процветает пышным цветом в капиталистической науке. Конкурируют фирмы, конкурируют страны, наука развивается дисгармонично, противоречиво, и наряду с несомненными успехами возникают кризисы, порождаемые несоответствием развития науки и буржуазного руководства наукой. Как уже указывалось в предыдущей главе, капиталист ценит в науке то, что обеспечивает ему максимальную прибыль, подавление конкурента, монопольное положение. Эти черты очень ярко выступают в истории американской науки. Рассматриваемый нами период характеризуется интенсивным развитием техники, в особенности электротехники в США. Однако этот рост происходит за счёт импорта идей из России и Западной Европы. Вот что написано в одной из книг по электричеству конца XIX в.

«Что касается до изобретательности американцев в области электротехники, то надо заметить, что начало большинства этих изобретений следует искать в Европе. Динамо-машина,

¹ В. И. Ленин, Соч., т. 18, стр. 545—546.

дуговая лампа, трансформатор, электродвигатель, электрическая железная дорога и электрические процессы зародились в Европе, здесь же прожили своё первое детство телефон и лампа накаливания... Впрочем, подобное же явление встречается во многих других областях, и можно с полной справедливостью сказать, что идеи возникли в Европе, а созревали в Америке, что, конечно, для американцев будет неприятно слышать»¹ (разрядка моя.— П. К.).

А вот свидетельство К. А. Тимирязева: «Что эти два процесса — производство и потребление науки — при современном развитии междунаро-



Рис. 44. Т. А. Эдисон в своей лаборатории

ного обмена мысли могут в течение известного промежутка времени идти вне взаимной связи, разительным примером того может служить развитие естествознания... в Соединённых Штатах, только почти на глазах нашего поколения создавших самостоятельную науку, но уже давно воспользовавшихся её завоеваниями в Старой Европе»² (разрядка моя.— П. К.).

Приведём ещё высказывание И. И. Мечникова, относящееся к 1878 г.: «Изумительно быстрое развитие Соединённых Штатов может служить нагляднейшим примером несовпадения успехов практической материальной культуры с преуспеянием высших проявлений человеческого духа. Рядом

¹ А. Вильке, Электричество, СПб, 1895, стр. 730.

² К. А. Тимирязев, Сочинения, т. V, Сельхозгиз, 1938, стр. 71.

с не имеющим ничего равного прогрессом прикладного знания, промышленности и торговли Соединённые Штаты представляют сравнительно ничтожное движение в области искусства и теоретической науки»¹ (разрядка моя.— П. К.). В этом месте Мечников прибавляет: «По мнению многих лиц, хорошо знакомых со страной, нравственность американцев стоит также на очень невысоком уровне». Упомянув о всем известных рассказах о продажности американских чиновников и печати, Мечников приводит цифры, характеризующие преобладающую роль торговли в профессиях американских граждан (в земледелии 18%, промышленности 28%, торговле 44%). «Без являющихся извне рабочих американская почва не могла бы давать те богатые жатвы, которые необходимы для нас», — цитирует Мечников слова одного «из компетентных судей по части американской жизни».

Приведем в заключение свидетельство современного американского автора, относящееся уже к сегодняшней эпохе, когда теоретическая наука в США достигла весьма высокого уровня: «Нередко американцы, ослеплённые гигантскими размерами заводов в Окридже и Хэнфорде, не понимают, что их сооружение было достижением чисто технического порядка. В основу этих достижений были положены все последние научные принципы, разработанные главным образом в Европе. Эти принципы, на основе которых была создана американская бомба, были разработаны гением ученых различных стран: лордом Резерфордом (Англия), профессором Эйнштейном (Германия), супругами Жолио-Кюри (Франция), Ганом и Штрассманом (Германия), Бором (Дания). Этот длинный список включает ученых почти каждой европейской страны, в том числе и России.

Если бы американские ученые попытались осуществить свои атомные планы без прямой помощи со стороны многих европейских исследователей, испытание атомной бомбы, конечно, не могло бы состояться в 1945 году. Если бы мы пользовались услугами одних лишь чистокровных американцев, мы погубили бы наш атомный проект»².

Сказанным мы вовсе не хотим умалить заслуги американских учёных. Америка уже в этот период дала таких первоклассных физиков-теоретиков, как Дж. В. Гиббс. Речь идёт о том, что американский капитализм, в погоне за быстрейшим достижением практических результатов, по существу задерживал развитие своей теоретической науки. Так обстоит дело с новыми чертами в развитии физики, вызванными новой фазой развития производительных сил и социально-экономическими сдвигами.

Описывать эволюцию физики за период 1870—1900 гг.

дело нелёгкое. Обилие фактов и открытий, сделанных в этот период, делают задачу сколько-нибудь полного обзора этих открытий почти невозможной. Мы избираем

здесь такой путь характеристики этой эволюции: вначале опишем на примере одного из курсов физики 70-х годов тот, по тогдашним представлениям, «золотой фонд» физической науки, с которым считали необходимым знакомить обучающихся в университетах, а затем перейдём к характеристике курса начала XX в. В качестве типичных образцов мы выберем курсы русских физиков Ф. Ф. Петрушевского (1874) и Н. А. Умова (1901). Эти курсы

Курс
экспериментальной
физики 70-х годов.

¹ И. И. Мечников, Сорок лет искания рационального мировоззрения, 1914, стр. 200—201.

² Р. Лэпп, Новая сила. Об атомах и людях. Изд-во иностранной литературы, 1954, стр. 46.

типичны потому, что они проникнуты стремлением изложить современный уровень науки, проникнуты духом современных задач в том его значении, как понимали его авторы этих книг. Вместе с тем отличительной чертой русских курсов физики была их высокая объективность, они свободны от той национальной ограниченности, которой нередко грешили книги английских и немецких авторов, и охотно освещали всё то, что казалось им заслуживающим внимания у физиков любой национальности. Мы начнём с обзора «Курса наблюдательной физики» профессора Петербургского университета Ф. Ф. Петрушевского. Отметим здесь, что Петрушевский был одним из пионеров экспериментального обучения физике. Им в 1865 г. была организована в Петербургском университете первая учебная лаборатория по физике. Это обстоятельство придаёт его курсу особый интерес.



Ф. Ф. Петрушевский

«Цель, к которой стремится физика, — говорит Петрушевский в предисловии ко второму изданию своего труда (первое вышло в 1868 г.), — заключается в приведении целых рядов явлений к частным началам и в приведении этих начал к одному общему. Полное достижение этой цели возможно только при посредстве математики; «при посредстве», потому что одна математика или один опыт не могут создать полной теории — венца физических знаний. Математическая физика, довольствуясь первыми данными, положенными в её основание, может идти далеко. При постоянном удалении от фактов она принимает, наконец, характер отвлечённости, и хотя формулы её скрытно содержат законы действительности, но часто самый мощный математический ум не в состоянии найти в этих формулах реальное, физическое значение. Ум человека вообще не может с пользой постоянно пребывать в отвлечённости, а в деле физики обязан беспрестанно обращаться к реальности, чтобы не заблудиться...»

Задача наблюдательной физики состоит, между прочим, в исправлении основных начал теории и в приближении их к истине; опыт подаёт решающий голос среди теоретических сомнений. Поэтому наука наблюдать имеет для физики значение, равное значению математического анализа¹.

В этих словах, написанных в 1873 г., Петрушевский очень ясно и правильно рисует роль эксперимента и математики в познании законов действительности. Как видно, конечной целью физической науки он считает создание «полной теории», т. е. последовательной, связной картины всех физических взаимосвязей. Однако он не говорит, на каких началах должна быть создана такая теория. Можно, однако, не сомневаться, что, как и все физики XIX столетия, он разделял программу Ньютона: вывести все явления природы из начал механики. Об этом убедительно говорит и содержание курса.

Курс состоит из двух томов. Обширный (свыше 250 страниц) первый отдел первого тома посвящён измерительным приборам и методам наблю-

¹ Ф. Ф. Петрушевский, Курс наблюдательной физики, СПб, 1874, т. I, стр. II.

дения. Этот отдел является по существу первым русским руководством по технике физического эксперимента и даёт яркое представление о тогдашнем её уровне. Вначале рассматриваются микрометры, даётся сравнительная оценка их различных типов, затем компараторы, причём подробно опи-



Рис. 45. Титульный лист учебника Ф. Ф. Петрушевского

сывается компаратор и метод Купфера для изготовления эталонов русской сажени, катетометра. Далее описывается делительная машина конструкции петербургского механика Бауэра, сферометры и оптические микрометры, в том числе и интерференционный микрометр конструкции самого автора.

После главы об измерении углов идёт глава об измерении объёмов. Здесь описан волюмнометр Реньо и методы калибрования объёмов. Далее, в главе об измерении давления, даётся теория чувствительных весов, описываются точные весы и методы взвешивания.

Излагая методы определения плотностей, Петрушевский описывает прибор, служивший «г. Менделееву для чрезвычайно точных определений удельного веса» жидкостей. В конце главы обстоятельно описаны барометры различных конструкций и манипуляции с ними. В литературных приме-

чаниях и дополнениях к главе (они имеются в каждой главе) дана теория и описаны конструкции десятичных весов. Автор стремится познакомить читателя с самыми современными методами и инструментами, даёт критические оценки инструментов и измерительных приборов.

В пятой главе описаны конструкции и даётся теория крутильных весов; дана теория и описание гальванометров. В качестве примера приведём взятое из этой главы описание гальванометра Гогена (рис. 46).

Гальванометр Гогена, принадлежащий физическому кабинету Петербургской академии наук, считался в 70-х годах наиболее совершенным прибором этого типа. Гальванометр состоит из двух усечённых металлических конусов B и B' с параллельными основаниями и общей вершиной. Конусы усечены на одинаковом расстоянии от вершины. Подвижная система состоит из маленького магнита, подвешенного на нити в пространстве между конусами. С магнитом соединено подвешенное на той же нити зеркальце (находится внутри коробочки H). На конусы навита обмотка, включаемая в цепь тока так, что можно включать лишь обмотку одного конуса (при сильных токах), либо обоих последовательно (при слабых токах). Отклонения зеркальца наблюдаются в зрительную трубу NMK . Если стрелка мала и помещена на расстоянии D от центра круга, расположенного в плоскости магнитного меридиана, то при прохождении по кругу радиуса R тока I стрелка отклонится на угол φ , зная который можно вычислить силу тока:

$$I = \frac{X(R^2 + D_1^2)^{\frac{3}{2}}}{2\pi R^2} \operatorname{tg} \varphi.$$

X — горизонтальная составляющая магнитного поля земли.

Если принять во внимание длину стрелки $2L$, то более точный подсчёт даст:

$$I = \frac{X(R^2 + D_1^2)^{\frac{1}{2}}}{2\pi R^2} \operatorname{tg} \varphi \left[1 - \frac{L^2(R^2 - 4D_1^2)}{4(R^2 + D_1^2)^2} (3 - 15 \sin^2 \varphi) \right].$$

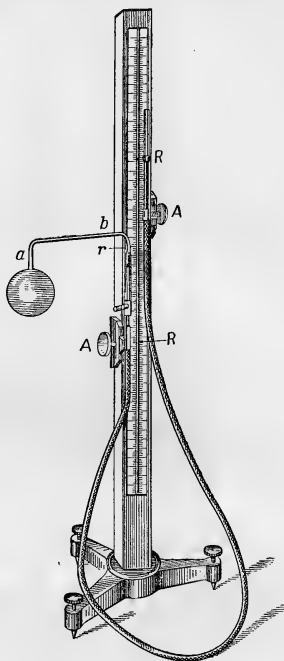


Рис. 45а. Воздушный термометр Жоли (рисунок из учебника Ф. Ф. Петрушевского)

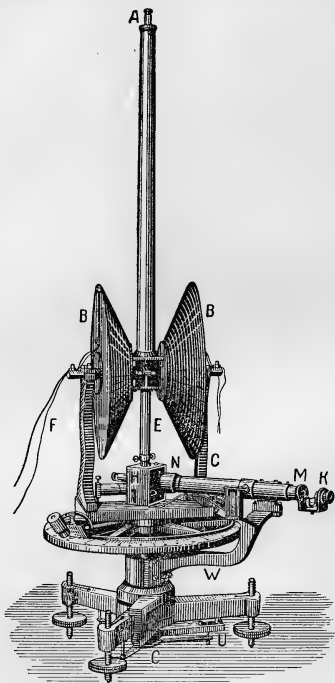
Если $R^2 = 4 D_1^2$, т. е. если центр стрелки отстоит от центра круга на расстоянии, равное половине радиуса круга, то формула переходит в предельную (поле в области, занятой стрелкой, можно считать однородным).

Если представить себе конус, вершина которого отстоит от основания на расстояние, равное половине радиуса основания, то любое сечение конуса, параллельное основанию, будет удовлетворять этому условию. Таким образом, если конус обвить проволокой, то действие каждого витка будет пропорционально $\operatorname{tg} \varphi$. Это и является теоретической основой гальванометра Гогена. Проф. Ф. Ф. Петрушевский заключает описание этого прибора в своём «Курсе наблюдательной физики» следующей характеристикой: «Полная система наблюдений на этом приборе довольно сложна, и самый прибор по своей ценности не может войти во всеобщее употребление, но он построен совершенно по указаниям теории». Практика требовала других, более удобных, дешёвых и надёжных приборов. Они были построены на других принципах. В шестой главе описаны методы измерения скоростей и ускорения.

Здесь дано краткое описание (без чертежа) машины Атвуда, теория маятника и метод определения ускорения тяжести маятником, при рассмотрении определения скорости описаны способы проверки равномерности движения,

Рис. 46. Гальванометр Гогена (рисунок из учебника Ф. Ф. Петрушевского)

в том числе и акустический способ Фуко с помощью сирены. Далее описаны инструменты для измерения скорости течения жидкости и анемометры. В главе об измерении времени описаны конструкции компенсационных маятников и методы определения малых промежутков времени с помощью искрового колебательного разряда; далее описывается ряд конструкций хроноскопов и хронографов.



Глава восьмая посвящена измерению температур. Петрушевский даёт такое определение температуры: «Температурою тела называется такое состояние его, при котором некоторая часть теплоты, находящейся в теле, остаётся постоянною по количеству и качеству». Это определение не выдерживает критики как в смысле точности и определённости понятия, так и в отношении ясности. Петрушевский различает температуру от числа,

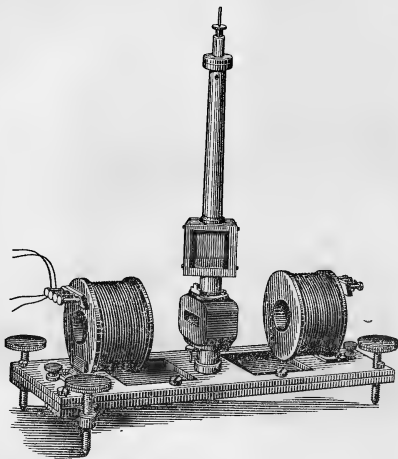


Рис. 47. Гальванометр Видемана (рисунок из учебника Ф. Ф. Петрушевского)

её измеряющего. «Числа, измеряющие температуру, косвенным и неопределённым образом указывают на состояние тела». Здесь уже содержится начало современного определения температуры как некоторой функции состояния, обладающей определёнными свойствами. В главе описывается расширение стекла и приведены соответствующие эмпирические формулы, воздушный термометр Реньо и Жоли, описаны ртутные термометры и приведена таблица упругости паров для интервала температур $85-101^{\circ}\text{C}$, дана подробная теория ртутных термометров и таблица сравнения ртутных термометров, изготовленных из разных сортов стекла, с воздушным. Далее описан весовой термометр и термометры других конструкций. Наконец, описываются термоэлементы (термомультипликаторы) и пирометры.

Последняя (девятая) глава отдела посвящена фотометрии. В начале главы даны фотометрические законы Ламбрта и описаны принципы фотометров Румфорда, Ричи, Витсона, Бунзена, Тальбота. Из поляризационных фотометров здесь описан только фотометр Бабинэ. Далее описываются

астрофотометры и принцип астрофотометра, среди них фотометр Цельнера. Затем Петрушевский переходит к объективной фотометрии («динамические фотометры», основанные на химических и тепловых действиях света). Описан прибор Бунзена и Роско, с помощью которого было установлено, что «для одного и того же источника количество химического действия пропорционально световому количеству»; в заключение дается «отчёт о любопытных, хотя и мало точных определениях Томсона, которые имеют целью измерение силы света посредством механической работы».

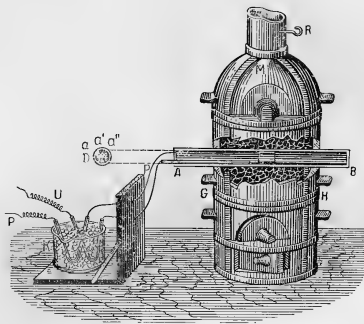


Рис. 48. Опыт Беккереля по сравнению термического пирометра с воздушным (рисунок из учебника Ф. Ф. Петрушевского)

Таково содержание первого отдела курса. После сравнения его с соответствующим разделом курса Умова мы можем составить представление, насколько изменилась техника эксперимента за тридцатилетие, и дать оценку этой части курса с современной точки зрения. Но здесь уже можно сказать, что эта часть курса была написана на уровне тогдашней физики, содержала многие важные (иногда даже излишне подробные) детали, давала литературные и исторические указания. Несомненно, что своим курсом Петрушевский способствовал повышению экспериментальной культуры в России.

Второй отдел посвящён акустике. Отдел состоит из двух глав: физико-механическое учение о звуке и физико-физиологическое учение о звуке. В первой главе очень интересна в методическом отношении диаграмма образования продольных волн (она потом была воспроизведена в курсе физики Хвольсона). Такой же интерес представляют рисунки образования стоячих волн при отражении. В приложении дана математическая теория колебательного движения, интерференции распространения звука в среде и ряд других вопросов. В этой главе ясно и достаточно полно изложена физическая акустика того времени. Второй раздел построен на классической книге Гельмгольца «Учение о звуковых ощущениях». Заканчивается раздел акустическим принципом Доплера; описан прибор Маха для его демонстрации.

Третий отдел книги посвящён оптике. Эта часть начинается с рассмотрения явлений, общих для поляризованных и неполяризованных лучей. К таким автор прежде всего относит дисперсию. Описывается разложение света призмой, измерения с спектрометром, измерения показателей преломления для различных длин волн различных веществ, конструкции спектрометров. Описываются типы спектров, приводятся спектры звёзд. Далее идут цвета тел, флюоресценция и фосфоресценция, описан фосфороскоп Беккереля. Глава заканчивается изложением вопросов геометрической оптики.

Вторая глава посвящена теории явлений, описанных в первой главе. Упомянув о теории истечения Ньютона, автор переходит к гипотезе волнового движения в эфире. Описан опыт Фуко, как решающий в споре между двумя теориями. В дальнейшем изложены интерференционные и дифракционные явления.

Третья глава посвящена линейно поляризованному свету и начинается с изложения преломления света в одноосных кристаллах. После небольшого параграфа о преломлении в двухосных кристаллах излагаются теории двойного преломления по Френелю (эллипсоид упругости). После конической рефракции описывается поляризация отражением и преломлением. В дополнительных примечаниях по Френелю дан вывод формул отражения и преломления.

Глава четвёртая посвящена интерференции линейно-поляризованных лучей, пятая — эллиптической поляризации и явлениям вращения плоскости поляризации. Заканчивается глава параграфом о магнитном вращении плоскости поляризации. В примечаниях кратко говорится о явлениях при полном отражении (проникновение вглубь и зависимость этого проникновения от характера поляризации).

Последняя глава посвящена оптическим приборам. В дополнениях к главе между прочим рассмотрена гауссова теория оптических систем. Во втором томе изложено учение о теплоте, учение об электричестве и физика частичных сил (т. е. молекулярная физика). С исторической точки зрения этот том представляет наибольший интерес, так как первый том содержит классические, мало изменённые временем вещи, выработанные физикой XVII, XVIII и первой половины XIX в. Второй том трактует о вещах, которые в 70-х годах нахо-

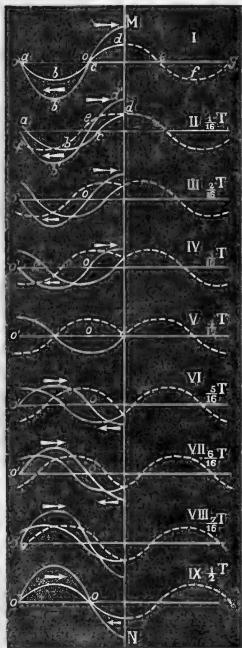


Рис. 49. Образование стоячих волн в открытых трубах, по Ф. Ф. Петрушевскому

дились в стадии становления и потому подвержены были быстрому изменению.

Первые три главы учения о тепле посвящены описанию свойств так называемых «тепловых лучей» (разложение тепловых лучей преломлением и отражением, поляризация и интерференция тепловых лучей, испускание и поглощение тепловых лучей). Это очень характерное для физики середины

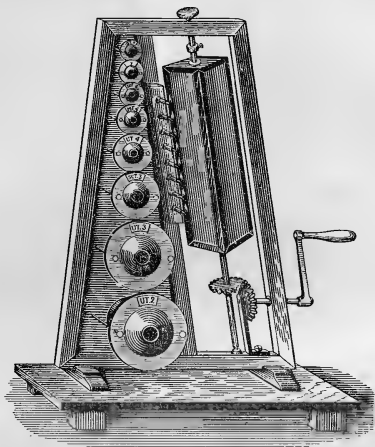


Рис. 50. Демонстрационный прибор для анализа состава сложного звука (рисунок из учебника Ф. Ф. Петрушевского)

XIX в. распределение матернала. При этом у Петрушевского тепловые лучи — это не инфракрасные лучи, а лучи, создающие теплоту при их поглощении. Приводя результаты опыта Жамена и Масена по поглощению видимого света и одновременно полученной теплоты, Петрушевский делает вывод, что «тепловые лучи видимой части спектра не могут быть отделены от световых лучей равной преломляемости ни преломлением, ни поглощением». Однако он не решается сделать тот вывод, что никаких особых тепловых лучей не существует, по крайней мере в видимой части спектра.

Характерно название четвертой главы: передача теплоты частичным движением. Речь идёт о явлениях теплопроводности, и название говорит о том, что автор стоит на точке зрения молекулярного механизма этого процесса. Но содержание главы содержит только экспериментальные данные и формальное описание процесса. Такой же формально-эмпирический характер носит глава, посвящённая тепловому расширению тел. Однако в параграфе «Общие отношения газов к теплоте» содержится ряд

положений кинетической теории газов. Указывается, что при одинаковой упругости и температуре кинетическая энергия частиц одинакова и, следовательно, скорость различных частиц обратно пропорциональна корням, квадратным из плотностей газов, даётся понятие о молекулярном обосновании упругости газов и закона Бойля-Мариотта, указывается, что «изменения температуры и количества теплоты в газах тождественны с изменением живой силы их», вводится понятие об абсолютном нуле, совершенно

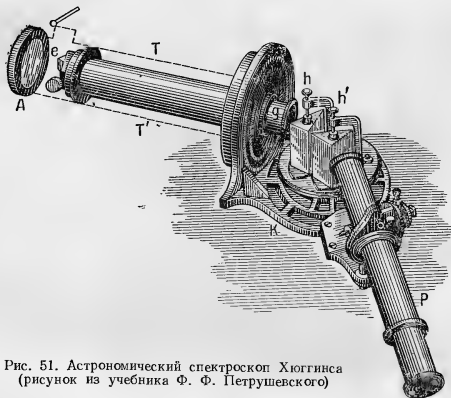


Рис. 51. Астрономический спектроскоп Хюггинса (рисунок из учебника Ф. Ф. Петрушевского)

в духе Ломоносова: «Если допустить, что, действием внешних сил на газ, живая сила его при известных обстоятельствах может уничтожаться, то вместе с тем уничтожается вся его теплота; тогда температура его достигнет такой точки, которая называется абсолютным нулем». Далее идёт глава об изменении объёма и плотности тел при плавлении и главы, посвящённые калориметрии. Отдельная глава посвящена упругости паров в зависимости от температуры. Раздел о теплоте заканчивается механической теорией теплоты, в которой излагаются начала термодинамики для равновесных процессов. Первое главное уравнение термодинамики Петрушевский пишет в виде:

$$\left(\frac{dY}{dp}\right) - \left(\frac{\partial X}{\partial v}\right) = 1.$$

Здесь X и Y определяются следующим образом. Дифференциал внутренней энергии

$$du = \left(\frac{\partial u}{\partial p}\right) dp + \left(\frac{\partial u}{\partial v}\right) dv = X dp + Z dv.$$

$$Y = Z + p,$$

Тогда уравнение, приведённое Петрушевским, легко получается, если иметь в виду, что дифференциал энергии есть полный дифференциал. Другой полный дифференциал получается из уравнения

$$dQ = A(du + dL),$$

где dQ — сообщённое количество тепла, A — термический эквивалент работы, du — изменение внутренней энергии, dL — совершённая работа. Так как для работы

$$dL = pdv, \text{ то } dQ = A(Xdp + Idv);$$

ищется интегрирующий множитель, который, по Цейнеру, Петрушевский принимает равным абсолютной температуре, обозначаемой им $a + t$. Тогда главное уравнение будет иметь вид:

$$a + t = Y\left(\frac{dt}{dp}\right) - X\left(\frac{dt}{dv}\right).$$

Далее приводятся некоторые приложения полученных формул. В примечаниях автор указывает, что он придерживался сочинения Цейнера «Grundzuge der mechanischen Wärmetheorie», и указывает пособие на русском языке — книгу М. Окотова «Термостатика», 1871. Таким образом, краткое изложение Петрушевского и курс Окотова являются первыми руководствами по термодинамике на русском языке.

Большое внимание уделял термодинамике и ее техническим приложениям про-

фессор Технологического института (позднее министр финансов) И. А. Вышнеградский (1831—1895), читавший в технологическом институте курс механической теории теплоты. Первое издание этого курса не разыскано. Второе литографированное издание вышло в 1868 г. и переиздавалось опять-таки в литографированном виде до 1881 г. Последние главы курса под названием «Приложения к механической теории теплоты» вышли в 1891 г. «Этот читанный Иваном Алексеевичем курс механической теории теплоты всегда имел большой успех и привлекал значительное количество слушателей», — вспоминал ученик Вышнеградского проф. В. Л. Кирпичев.

Пятый отдел курса Петрушевского посвящён электричеству. Во вводных замечаниях автор касается вопроса о сущности электричества, указывает, что ранней теорией была теория двух родов электрических веществ, которая дала возможность построить математическую теорию. «Теперь представляется достаточно причин, чтобы отвергнуть прежнее понятие об электричестве, но привести новое мы не в силах; по невозможности приступить к новому понятию о состоянии науки должна довольствоваться прежним неясным представлением о веществе». В заключение автор указывает: «Успех учения об электрическом состоянии зависит от развития физики частичных сил».

В дальнейшем изложение ведётся формально-описательно. Много места уделил Петрушевский расчётам и описаниям экспериментов, взятым

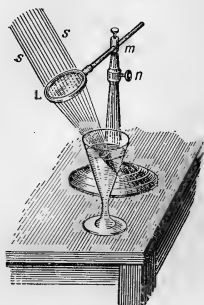


Рис. 52. Прибор для наблюдения явления флюоресценции (рисунок из учебника Ф. Ф. Петрушевского)

из своей работы 1862 г. «Способы определения полюсов магнитов и электромагнитов» и последующей работы 1868 г., посвящённых развитию этого вопроса. Работа 1862 г. была магистерской диссертацией Петрушевского. За изложением этих работ следует тесно примыкающий к ним параграф о «нормальном намагничивании». «Под названием правильного или нормального намагничивания понимают обыкновенно такое, при котором все частицы стали или железа подвергались одинаковой намагничивающей силе».

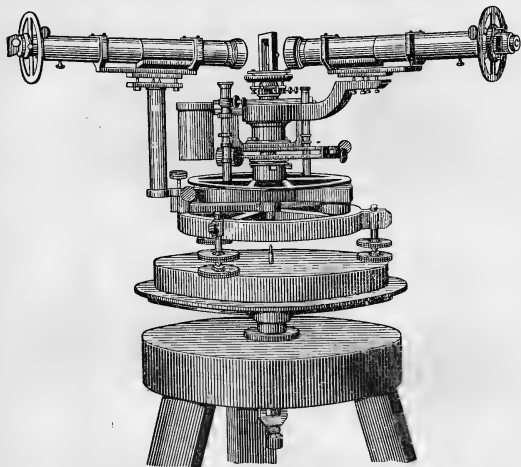


Рис. 53. Спектрометр Ангстрема для измерения длин волн (рисунок из учебника Ф. Ф. Петрушевского)

В параграфе описаны результаты исследования «нормального» намагничивания. Исследование это было проведено Петрушевским в 1865 г. и явилось его докторской диссертацией.

В дальнейших главах идёт речь об электрометрии: сначала рассматриваются электростатические измерения, включая и измерения электродвижущих сил гальванических элементов электрометром, затем измерения в цепи постоянного тока. При измерениях напряжения за единицу принимают «электровозбудительную силу свежезаряжённого элемента Даниэля».

Далее даны оба правила Кирхгофа и примеры на их применения, описан компенсационный способ Потгендорфа измерения э. д. с. и мостик Уитстона. Описаны и другие методы тех же измерений. Сопротивление определяется в ртутных единицах Сименса. Приведена таблица Бенуа, выражающая сопротивление проволок различных металлов длиной 1 м поперечного сечения 1 мм при 0° в единицах Сименса. Приводятся данные о со-

противлении электролитов Горсдорфа, Видемана и Савельева при самых различных единицах, указывается на большие расхождения в оценках этих сопротивлений (способ Кольрауша определения сопротивления элект-

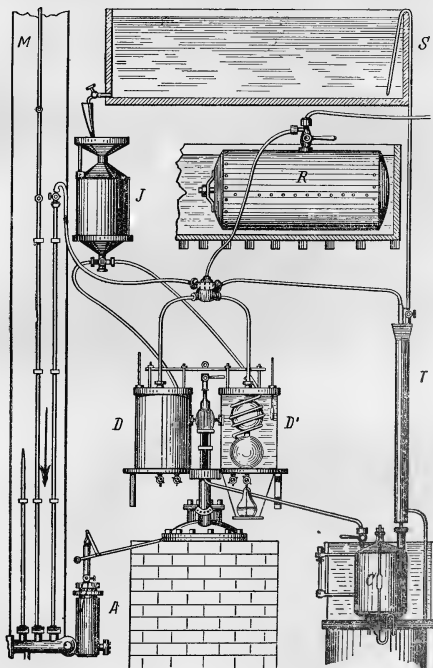


Рис. 54. Установка Реньо для определения скрытой теплоты испарения (рисунок из учебника Ф. Ф. Петрушевского)

А — котел с водой, вмазанный в печь; D и D' — калориметры; R — железный цилиндр со сжатым воздухом; M — манометр для измерения давления воздуха в цилиндре; I — сосуд с известным количеством воды; T — трубка, через которую протекает вода, охлаждающая пар, поступающий в сосуд C, предназначенный для принятия и охлаждения избытка пара

тролитов ещё не известен). «По измерениям Пулье, сопротивление раствора медного купороса в 16 000 000 более сопротивления меди, по Ленцу в 6 857 000 и по Беккерелю в 16 885 000». Приведены примеры ещё более разительных расхождений в оценке сопротивления электролитов.

Специальный параграф посвящён вопросу об измерении «электровозбудительной силы поляризации». Во всех этих работах часто упоминается Ленц. В параграфе об измерении силы тока сказано, что она «измеряется почти исключительно отклонением магнитной стрелки гальванометра». «Измерение силы химическим действием непрактично, однако в некоторых случаях употребляется». В примечаниях к главе описаны два гальванометра Нервандера, в том числе и его первый в мире тангенс-гальванометр.

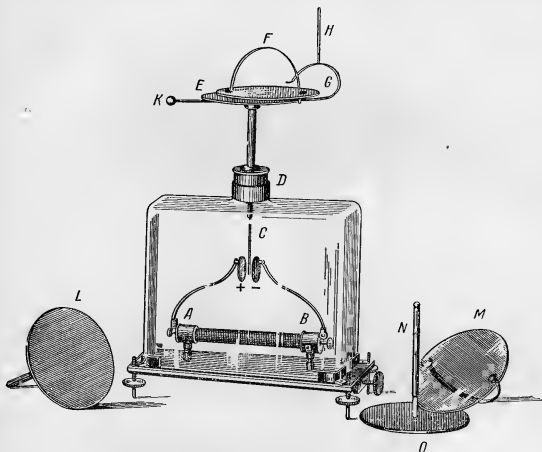


Рис. 55. Прибор для наблюдения контактной разности потенциалов (рисунок из учебника Ф. Ф. Петрушевского)

E — металлический круг; *G* — полоска из того же металла; *H* — стеклянная ручка; *F* — стеклянная пластинка; *C* — золотой листочек; *AB* — вольтов столбик

Специальная глава посвящена вопросу о скорости «электризования и намагничивания». Описаны опыты Уитстона и приведен его результат $462\,000\text{ км/сек.}$ К этим данным автор относится осторожно и даже скептически. Описаны далее опыты Фарадея «над распространением электричества в проводниках», из которых следует, «что распространение гальванического тока зависит от среды, окружающей проводники, и не зависит от напряжённости тока».

Далее описываются опыты Гильемина (1860), в которых, в отличие от метода Фарадея, измеряются промежутки времени, соответствующие разным фазам движения тока. Из опытов следует, «что продолжительность переменного состояния возрастает гораздо быстрее, чем длина проводников (но медленнее, чем квадраты длины); поэтому вопрос об измерении скорости электричества теряет свою определительность, тем более, что во многих случаях невозможно устранить влияние индукции».

Приведя данные различных наблюдателей, в которых скорость электричества в медных проволоках колеблется от 460 000 до 4 300 км/сек, Петрушевский замечает, что нельзя «приписать этим числам никакого абсолютного значения».

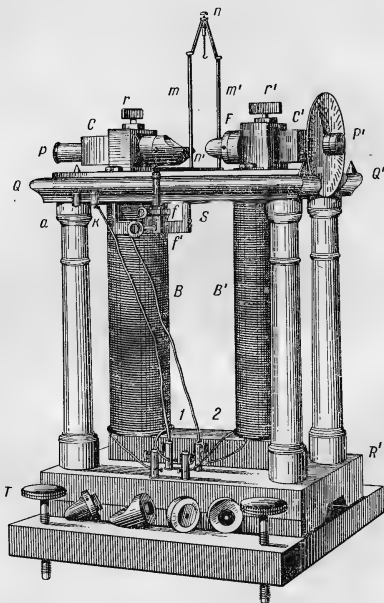


Рис. 56. Большой электромагнит для диамагнитных исследований ($\frac{1}{7}$ натуральной величины) (рисунок из учебника Ф. Ф. Петрушевского)

В следующем параграфе описан ряд попыток определить «скорость намагничивания».

В главе «Электрические явления в твёрдых телах» описаны изменения механических свойств металлов при прохождении токов, тепловые действия тока, причём описаны классические эксперименты Ленца и термоэлектрические явления.

В следующей главе «Электрические явления в жидкостях» описаны сначала механические действия — пульсации ртути, электроосмос, тепло-

вые действия тока в жидкостях и, наконец, электролиз. В примечаниях описана гальванопластика.

В главе «Электрические явления в газах» приведены описания различных видов разряда, в том числе и дугового. В дополнениях описано устройство ртутного насоса Шпренгеля и двух регуляторов (Серрена и Фуко) для дуговых ламп. «Лампа Серрена уже много лет употребляется на маяках и признана вполне надёжной». «Механизм лампы Фуко также вполне надёжен».

В десятой главе описаны механические взаимодействия зарядов и токов, заключительная часть главы посвящена опытам и теории Ампера. В одиннадцатой главе речь идёт об «электродинамической индукции»; здесь много говорится об исследованиях Ленца. Следующая глава называется «Магнетизм в отношении к химизму, кристаллизации и вообще строению тел». Здесь описаны многочисленные попытки установить связь между магнетизмом (пара- или диамагнетизмом) и атомным весом тел, последний параграф посвящён магнетизму кристаллов. Глава тринадцатая «Абсолютное измерение магнетизма и гальванического тока» посвящена вопросу об установлении абсолютной системы единиц. Описан метод Гаусса измерения магнитных сил, работы Лебедева по измерению сопротивления в абсолютных единицах, работы Британской ассоциации по изготовлению абсолютной единицы сопротивления. В примечаниях приведена таблица результатов этих работ (единица Британской ассоциации здесь называется «омада»):

«Омада = 1,570 ед. Якоби = 1,088 ед. Вебера = 1,0456 ед. Сименса (1864) = 0,1079 ед. Даниэля. Ед. Якоби (25 фут. медн. проволоки 34,5 гранов весу) = 0,6367 омады = 0,6925 ед. Вебера = 0,6655 ед. Сименса = 0,06869 ед. Даниэля.

Единица Вебера (10^7 м/сек электромагнитных единиц, 1862) = 0,9191 омады = 1,444 ед. Якоби = 0,9067 ед. Сименса = 0,09919 ед. Даниэля.

Единица Сименса (1 м ртути при 0° , с поперечным сечением в 1 кв. мм, 1864) = 0,9563 омады = 1,503 ед. Якоби = 1,043 ед. Вебера = 0,1033 ед. Даниэля.

Единицы Даниэля (1 км железной проволоки в 4 мм толщины, температура неизвестна) = 9,266 омады = 14,56 ед. Якоби = 10,08 ед. Вебера = 9,0968 ед. Сименса».

Четырнадцатая глава — «Физические гипотезы электрических явлений».

В параграфе, посвящённом гипотезам об электричестве, вновь обращается внимание на неудовлетворительность концепции электрических жидкостей, указывается, что «важно изучить различие между двумя проявлениями одной силы, — между положительным и отрицательным электрическими состояниями», и описываются опыты, указывающие на такое различие.

Параграф заканчивается гипотезой Фарадея, которую автор представляет как гипотезу поляризации среды (в том числе и вакуума). По поводу

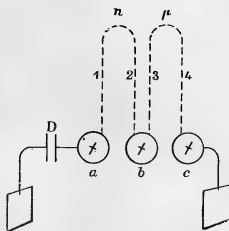


Рис. 57. Один из способов измерения «скорости гальванического тока», предложенный Фарадеем (рисунок из учебника Ф. Ф. Петрушевского):

D — батарея; a, b, c — гальванометры; 1, 2, 3, 4 — телеграфные провода между Лондоном и Манчестером

этой гипотезы автор говорит: «Вообще нельзя сомневаться, что на неё будет обращено большее внимание, чем до сих пор, коль скоро состояние науки того требует».

Из гипотез о магнетизме описаны три: гипотеза магнитных жидкостей (Кулона и Пуассона), гипотеза молекулярных токов (Ампер), гипотеза молекулярных магнитов (Видеман). Описаны опыты Видемана по сравнению действий кручения и намагничивания, из которых следует мысль, что «намагничивание сопровождается изменением расположения частиц железа».

В связи с вопросом о гипотезах тока даётся такое определение его: «Электрическим, или гальваническим, током называют движение противо-

положного электричества, по направлениям тоже противоположным» (стр. 583). Понятно, что, не зная, что такое электричество, мы не знаем и что такое его движение. Подробно описана гипотеза Фехнера и объяснение по этой гипотезе контактной электризации, электрохимическая теория Шейнбейна и в конце сказано о математической разработке теории Фехнера Вебером для индуктированных токов. Формула Вебера дана в примечаниях. Последняя (15-я) глава посвящена земному магнетизму.

В курсе, кроме того, подробно описаны конструкции электромагнитов (Джоуля, Ромерсгаузена, электромагнит для диамагнитных исследований Петербургского университета, электромагнит Румкорфа). Описано очень много конструкций гальванических элементов, приведены графики изменения силы тока со временем для различных элементов, полученные Петрушевским. Описаны также магнитоэлектрические машины (Кларка, Штерера, Синстедена,

Сименса, Альянс), динамоэлектрические машины (Сименса, Грамма, Вильке).

Последний, шестой, отдел книги посвящён «физике частичных сил». «Под названием частичных сил разумеют именно такие, которых действие обнаруживается чувствительным образом только на весьма малых расстояниях. Во многих случаях это действие передаётся почти осозательно от одной частицы к другой, от неё к следующей и т. д. на всякие расстояния. Если бы было доказано, что вообще всякое действие происходит таким образом, то всякое явление было бы результатом частичного действия и вся физика — физикою частичных сил».

В главе о твёрдых телах рассмотрена система кристаллов. Далее рассмотрены коллоиды, жидкости (где описаны опыты Плато), газы, сравнение трёх состояний между собой; описаны механические деформации, сжатие жидкостей и газов, сжижение газов; описаны насосы, в том числе насос Менделеева (1874).

Ртутный насос Д. И. Менделеева (рис. 59) представлял собой резервуар А, нижняя отводная трубка которого соединялась резиновой трубкой с сосудом В, содержащим ртуть. Верхняя изогнутая отводная трубка сосуда

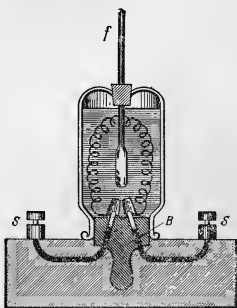


Рис. 58. Прибор Ленца для исследования «закона нагревания проводников гальваническим током» (рисунки из книги Ф. Ф. Петрушевского)

A оканчивается внутри другого сосуда *C*, также содержащего ртуть. Наконец боковая отводная трубка *aO* соединяет *AbO* с пространством, из которого откачивается воздух. К этой трубке в её нисходящей части припаян манометр.

Поднятием резервуара *B* заполняют ртутью *A*, выгоняя оттуда воздух через *C*, куда переливается и часть ртути (её излишек стекает в стаканчик

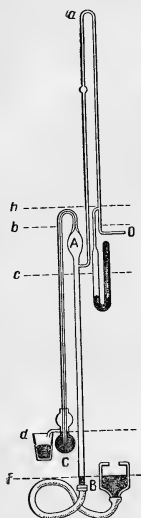


Рис. 59. Ртутный насос Д. И. Менделеева

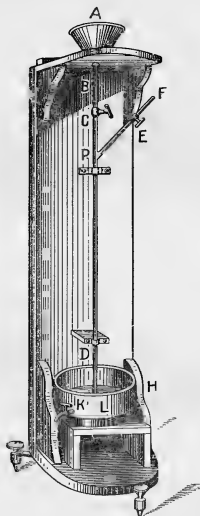


Рис. 60. Упрощённая форма насоса Шпренгеля

d, откуда снова переливается в *B*). Затем, понижая *B*, оставляют в *A* вакуум, куда и увлекается через *O* воздух из откачиваемого пространства. Многократным повторением операции можно достичь достаточной степени разрежения. На ином принципе основан ртутный насос Шпренгеля, изобретённый в 1865 г. и принадлежащий, так же как изобретённый в 1869 г. водяной насос Бунзена, к типу водоструйных. На рисунке 60 изображена упрощённая форма насоса Шпренгеля. Здесь *A* — воронка, в которую наливается ртуть. Трубка *F* соединяется с тем пространством, из которого требуется удалить воздух. По трубке *B* ртуть направляется в сосуд *L*. С помощью крана *C* создаётся капельный поток ртути. Принцип действия насоса заключается в том, что отдельные капли ртути, падающие вниз по узкой трубке, увлекают за собой попадающий между ними воздух.

Затем идёт глава «Перемена в свойствах тел от теплорода». Названием главы Петрушевский отдал дань своему учителю Ленцу. Последовательно рассмотрены: влияние света на строение тел (фотохимические действия), влияние магнетизма на строение тел (изменение размеров тел от намагничивания, упругость и т. д.), электричества и гальванизма на строение тел. Далее идут «явления соприкосновения тел», где рассмотрены сцепление и трение, электрические контактные явления, сцепление жидкостей, капиллярность. После подробного рассмотрения капиллярных явлений в той же главе рассматривается осмос, растворение и поглощение, абсорбция газов твёрдыми телами, соприкосновение газов с жидкостью.

В «Общих замечаниях о частичных силах» содержатся наброски атомно-молекулярной гипотезы.

Таков был университетский курс физики в 1873—1874 гг. И совершенно правильно писал В. К. Лебединский в некрологе Петрушевского через тридцать лет после выхода его учебника: «Целая эпоха в жизни петербургских физиков отошла с ним в вечность: эпоха френелевской теории света, исследования тепловых и химических лучей, исследования гальванических элементов и магнитоэлектрических машин»¹.

К этой характеристике Лебединского следует прибавить, что основной дух курса Петрушевского — это эмпиризм. Опыт и формально-математическое описание играют в нём преобладающую роль. Хотя автор и говорит об атомно-молекулярной гипотезе, о необходимости создания полной теории физических явлений, в его курсе нет какой-либо единой, связующей разрозненные факты концепции. Петрушевский не использует даже закона сохранения и превращения энергии для такого обобщения и наряду с термодинамикой отводит в своём курсе страницы и для отжившей концепции теплорода. Такой дух был ещё господствующим в физике 70-х годов; ещё был жив типичный представитель эмпирического направления в физике, редактор журнала «Annalen d. Physik» Поггендорф, не поместивший в своё время работы Мейера и Гельмгольца. Но уже начала сознаваться ограниченность эмпиризма, и всё настоятельнее ощущалась потребность в едином подходе к явлениям природы, стимулированная открытием великого закона. В учении о теплоте, в молекулярной физике всё сильнее и сильнее проступала линия механического объяснения этих явлений, что нашло отражение и в курсе Петрушевского.

Вопрос об электрических единицах.

Даже в такой области, как электричество, узко эмпирический подход приводил к ужасающему хаосу, одним из выражений которого была чрезвычайная запутанность вопроса об электрических единицах. В перечисленных в курсе Петрушевского определениях единиц мы не видим никакой теоретической мысли, а только эмпирический произвол. Этот произвол тормозил развитие науки об электричестве, покончить с ним стало насущной необходимостью.

На международной электрической выставке в Париже состоялся первый международный конгресс электриков, на котором был поставлен на разрешение вопрос о единицах. Была организована «Комиссия единиц», в состав которой вошли виднейшие учёные: Столетов, Гельмгольц, В. Томсон, Релей, Кирхгоф, Клаузиус, Беккерель, Жамен, Маскар, Этвеш и др. Комиссия единогласно постановила положить в основу метрическую систему мер, и в качестве основных единиц принять сантиметр, грамм, се-

¹ Очерки по истории физики в России, под ред. проф. А. К. Тимирязева, Учпедгиз, 1947, стр. 281.

кунду (CGS). В отношении выбора между системами CGSE и CGSM голоса разделились, однако было принято отдать предпочтение, как более удобной и более употребительной в практике, системе CGSM.

Особенно острая дискуссия разгорелась по вопросу выбора практической единицы сопротивления. Немцы настаивали на сохранении сименса, указывая на выгоды ртутного эталона, англичане отстаивали единицу британской ассоциации (омады), указывая на её близость к теоретической единице. Но сплав Матиссена, из которого была изготовлена омада, оказался подверженным изменениям со временем и в смысле определённости уступал ртутному эталону. Конец дискуссии был положен выступлением Столетова, которое в протоколе зафиксировано следующим образом:

«Профессор Столетов (Россия) замечает, что с точки зрения простоты обе системы (электростатическая и электромагнитная) имеют равные права: каждая из них оказывается более удобной, пока речь идёт о явлениях данного рода. *Притом следует сохранить обе системы и ради напоминания о той связи, какая существует, повидимому, между электричеством и светом* (курсив мой. — П. К.). Но можно дать некоторое преимущество электромагнитной системе, — чтобы не порывать связи с трудами Британской ассоциации и чтобы удовлетворить потребность практики, но, может быть, следует, удерживая теоретический ом, как единицу сопротивления, воспроизводить с помощью ртути наиболее точные эталоны. Если же примем единицу Сименса, то покинем научный базис системы, а это нежелательно».

Комиссия согласилась с глубоко продуманным предложением Столетова. Её постановление по вопросу о единицах гласит:

1. Для электрических измерений принимаются основные единицы: сантиметр, грамм-масса, секунда (CGS).

2. Практические единицы ом и вольт сохраняют настоящие определения: 10^9 для ома и 10^8 для вольта.

3. Единица сопротивления (ом) будет представлена колонкой ртути в квадратный миллиметр сечения при температуре нуль стогоградусного термометра.

4. Международной комиссии поручено определить с помощью новых опытов, для практики, длину колонки ртути в квадратный миллиметр сечения и при температуре нуль по стогоградуснику, которая представляет собой ом.

5. Ток, произведённый вольт в оме, называется а м п е р о м.

6. Количество электричества называется кулоном, если оно определено условием: ампер даёт кулон в секунду

7. Емкость называется фарадом, если она определена условием: кулон в одном фараде даёт вольт.

История науки не может пройти мимо факта борьбы русских учёных за взаимопонимание в интересах прогресса науки. Очень существенно, что Столетов внёс важное предложение для международной комиссии. Это предложение в протоколе зафиксировано так: «Г. Столетов (Россия) предлагает, чтобы Международная комиссия, которой поручено установление электромагнитных единиц, занялась бы также определением отношения электромагнитных и электростатических единиц, используя для этого все ресурсы современной науки. Важность этого вопроса для науки

¹ А. Г. Столетов, Собрание соч., т. I, Гостехиздат, 1948, стр. 347—348. (Перевод записи протокола сделан самим Столетовым.)



Г. Р. Кирхгоф

широчайшим образом оправдает труды, сопряжённые с этим измерением»¹.

Эта история показывает, что выход из тупика, созданного эмпириками в вопросе об электрических единицах, был найден на основе новых теоретических представлений о связи электричества магнетизма и света — на основе теории Максвелла. В этом суть замечательных предложений Столетова, с которыми согласился конгресс и которые раз и навсегда покончили с даниэлями, кларками, сименсами, заменив их теоретически обоснованными системами единиц.

Особенно яркой страницей в истории борьбы за преодоление эмпиризма является история научного триумфа Менделеева. Химия до Менделеева представляла собой сугубо эмпирическую науку, в которой не было единой связу-

ющей нити, за исключением атомного учения, которое также было атаковано эмпириками. Менделеев, руководствуясь этим великим учением, нашёл взаимную связь между свойствами различных химических элементов в виде своего знаменитого периодического закона. Одним из важнейших итогов развития физики и химии в последнее тридцатилетие XIX в. явилась победа менделеевского закона. Об этой победе следует рассказать более подробно.

Спектральный анализ. Открытие новых элементов.

Мы уже упоминали в первом томе, что Кирхгоф и Бунзен, открывшие спектральный анализ, в первой же работе 1860 г. сообщили об открытии ими нового щелочного металла, который был вскоре описан Бунзеном и назван цезием. В следующем 1861 г. Бунзен открыл рубидий. В 1862 г. В. Крукс открыл таллий, Рейх и Рихтер индий. Известный спектроскопист этого периода Локьер, которому, между прочим, принадлежит мысль, что линейчатый спектр возбуждается свободными атомами, а полосатый — молекулами, так описывает эти первые успехи спектрального анализа:

«В 1860 г. Кирхгоф и Бунзен, исследуя в спектроскопе маточный раствор дюрокгеймской минеральной воды, заметили несколько линий, которых они до того не видали, хотя тщательно измерили и срисовали спектры всех тогда известных тел. Стерпением химиков, веривших в свой инструмент, они выпарили не менее 44 200 килограммов дюрокгеймского раствора и получили семь с лишком граммов хлористого соединения нового металла, названного ими цезием. Вскоре последовало открытие другого до того неизвестного элемента, названного рубидием. Затем последовало открытие таллия Круксом, заметившим при спектральном исследовании селеновой руды из Гарца в высшей степени характерную линию великолепного изумрудно-зелёного цвета, до того никем не виданную. Спектр этого похожего на свинец металла (в видимой своей части) содержит лишь одну эту зелёную линию, и Крукс дал новому элементу имя от греческого слова *thallos*, которым обозна-

¹ А. Г. Столетов, Собр. соч., т. I, стр. 358.

чают роскошную окраску молодой и сильной растительности. Наконец, спектральному же анализу мы обязаны открытием ещё четвёртого элемента, именно — так называемого индия. Два немецких химика, профессора Рейх и Рихтер во Фрейберге, исследуя цинковую обманку, нашли две голубые, до того неизвестные спектральные линии, и им тотчас же удалось добыть новое тело в чистом состоянии, хотя и в небольшом количестве¹.

Еполне естественно, что взоры спектроскопистов устремились в недоступное обычному химическому анализу небесное пространство. И здесь уже Кирхгофу удалось доказать существование на солнце тех же веществ, что и на земле, и тем самым подтвердить важную философскую мысль, за которую боролся ещё Галилей, мысль о единстве материального

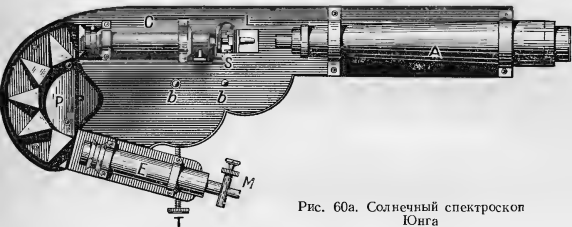


Рис. 60а. Солнечный спектроскоп Юнга

мира. В своё время Гёте резко выступал против Ньютона за то, что он своей призмой разрушил, по его мнению, «единство вечного света». Указывая на этот исторический факт, А. Г. Столетов заключает свой очерк, посвящённый Кирхгофу, глубоким вопросом: «Факты, открытые спектроскопом, не служат ли твёрдой опорой для одного из самых смелых синтезов нашего времени? Не говорят ли они красноречивее, чем что-либо с тех пор, как открыто всемирное тяготение; не говорят ли они о вещественном единстве и общем происхождении всей вселенной?»² Единство вещества, столь блестяще подтверждённое спектральным анализом и нашедшее своё выражение (о чём мы будем говорить далее) в гениальном открытии Менделеева, дополняется единством «вечного света». Синтез световых и электромагнитных волн в теории Максвелла даёт А. Г. Столетову повод поставить новый вопрос: «Нет ли в спектре солнца лучей с большей длиной волны, вроде герцевых лучей? Весьма возможно, что есть, что солнце шлёт к нам лучи, лежащие далеко за пределом инфракрасного спектра, не производящие заметного нагревания, но способные действовать электромагнитно»³.

Современная физика подтвердила это предвидение Столетова. Радиоастрономия ныне представляет признанную, бурно развивающуюся отрасль естествознания. Расскажем здесь об одном выдающемся успехе астроспектроскопии — открытии гелия.

В 1868 г. был впервые применён спектроскоп при наблюдении полного солнечного затмения. В момент вспышки тёмных фраунгоферовых линий

¹ Н. Локьер, Спектроскоп и его применения, М., 1901, стр. 59—60.

² А. Г. Столетов, Собр. соч., т. II, стр. 52.

³ Там же, стр. 256.

в спектре короны была обнаружена яркая жёлтая линия, которую естественно было принять за линию натрия. Так это и сделали почти все наблюдатели и только один (Погсон) осторожно указал, что эта линия была «у D_1 , или вблизи D_2 », т. е. не совпадала точно с линией натрия.

В том же году Локьер и Жансен разработали метод наблюдения светлых линий хромосферы в отсутствие затмения. Щель телескопоскопа с большим числом призм (рис. 60) была направлена по радиусу солнечного диска так, чтобы половина щели приходилась на диск, а другая половина выдавалась над ним в область короны. Тогда получаются друг над другом сплошной спектр солнца, прорезанный фраунгоферовыми линиями, и линейчатый спектр короны (благодаря большому числу призм сплошной спектр короны растягивается и становится слабым, а яркость линий не ослабевает).



Рис. 606. Спектр Солнца.

Таким путём Локьер открыл в спектре хромосферы линии водорода, как раз помещённые над соответствующими тёмными фраунгоферовыми линиями спектра диска. Но в жёлтой части была видна яркая линия, не совпадающая с линиями натрия D_1 и D_2 и вообще не совпадающая ни с какой тёмной фраунгоферовой линией. Более того, сравнивая положение этой линии со спектрами всех известных в 1868 г. веществ, Локьер не нашёл её ни в одном из этих спектров и вследствие этого приписал её неизвестному на земле элементу, входящему в состав солнечной атмосферы. Этот элемент он назвал гелием (солнечным) и соответствующую линию обозначил D_3 . Длина волны этой линии, по измерениям Роуланда, оказалась 587,598 $m\mu$.

В 1869 г. Локьер, Юнг и Лоренцони нашли ещё линии в спектре хромосферы, сопутствующие D_3 . Длины волны этих линий оказались 402,6, 447,2, 492,3, 501,7, 667,7 $m\mu$.

В 1886 г. линия D_3 была найдена в спектре туманности Ориона, а в 1892 г. Локьер нашёл линию D_3 и сопутствующие ей линии в спектре некоторых звёзд.

Через два года последовало открытие аргона, о котором мы скажем ниже. Рамзай в связи с этим открытием исследовал минерал уранит. Исследуя спектр газа, выделенного из этого минерала, в гейслеровой трубке, Рамзай увидел характерную чистую линию, которая оказалась не чем иным, как линией D_3 . Вскоре после этого Локьер выделил гелий из минерала клевента и ряда других редких минералов. Так был открыт на земле газ, найденный за 26 лет до этого на солнце.

Но дело этим не кончилось. Локьер и другие спектроскописты, применив спектроскопы высокой разрешающей силы, обнаружили, что ли-

ния полученного Рамзаем газа состоит из двух линий, из которых ни одна точка не совпадает с линией D_3 . Тогда астроспектроскописты стали тщательно исследовать линию хромосферы D_3 и обнаружили, что она так же двойная, как и линия клевентного газа. Земные наблюдения уточнили небесные. В тесной связи с этим выдающимся успехом спектроскопии находится уже упомянутое нами открытие аргона, которое является триумфом возросшей техники измерений. Недаром Майкельсон приводил это открытие в качестве примера, подтверждающего его мысль, что будущие открытия надо искать в шестом десятичном знаке.

В 1894 г. Релей установил, что веса одинаковых объёмов химически чистого азота и азота, полученного из атмосферы, не совпадают в точности. Атмосферный азот оказался на 0,5% тяжелее чистого. Тщательными исследованиями Рамзай и Релей установили наличие в атмосферном азоте примеси из инертного газа, который и был ими назван аргоном. В дальнейшем они открыли неон, криптон и ксенон.

Но не только экспериментаторы праздновали свои успехи в поисках новых элементов, этих «кирпичей мироздания». В этих открытиях блестящий триумф отпраздновало и теоретическое научное предвидение. Мы имеем в виду гениальное творение Менделеева, его периодический закон.

Ещё в своём первом сообщении, сделанном от его имени Русскому химическому обществу Н. А. Меншуткиным 6 марта 1869 г. и опубликованном в журнале общества, т. 1, 1869, он указывал: «Должно ожидать открытия ещё многих неизвестных¹ простых тел, например сходных с Al и Si элементов с паем 65—75»².

В сообщении 3 декабря 1870 г., носящем многозначительное заглавие «Естественная система элементов и применение её к указанию свойств некоторых элементов», Менделеев высказывается по поводу свойств некоторых элементов чрезвычайно конкретно. Вот, например, некоторые из его высказываний (мы опускаем всё, что Менделеев высказал относительно соединений этих элементов и их чисто химических характеристик), касающиеся элементов, ныне занимающих в таблицах места под номерами 21, 31, 32. По поводу будущего элемента № 21 Менделеев пишет:

«Элемент этот предлагаю предварительно назвать **э к а б о р о м**, производя это название от того, что он следует за бором, как первый элемент чётных групп, а слог **э к а** производится от санскритского слова, обозначающего один. $Eb = 45$. Экабор в отдельности должен представлять металл, имеющий объём атома около 15, потому что в ряду элементов второго ряда, как и во всех чётных рядах объём атома быстро уменьшается при переходе от первых групп к следующим. Действительно, объём калия близок к 50, кальция к 25, а объём титана и ванадия к 9, хрома, молибдена



Д. И. Менделеев

¹ Подчёркнуто Менделеевым.

² Д. И. Менделеев, Периодический закон, М., 1926, стр. 19.

и железа к 7; при этом удельный вес этого металла должен быть близок к 3,0, так как вес его атома = 45.

Этот металл не будет летуч, потому что и все металлы в чётных рядах во всех группах (кроме I) не летучи; следовательно, он едва ли может быть открыт обычным¹ путём спектрального анализа»².

Далее Менделеев даёт химическую характеристику экабора, о которой мы здесь говорить не будем:

Об элементе № 31 Менделеев говорит:

«Этот элемент мы назовём э к а л ю м и н и е м $E1 = 68$, потому что он следует тотчас за алюминием в третьей группе. В отличие от экабора, он должен обладать способностью давать металлоорганическое соединение и, занимая положение, среднее между алюминием и индием, он должен иметь свойства, близкие к этим двум элементам, квасцы, конечно, он образует... Объём его атома, судя по соображениям того же рода, какие приложены при определении свойства экабора, должен быть близок к 11,5, т. е. удельный вес его в металлическом состоянии будет близок к 6,0. Свойства этого металла во всех отношениях должны представлять переход от свойств алюминия к свойствам индия, и очень вероятно, что этот металл будет обладать большей летучестью, чем алюминий, а потому *можно надеяться, что он будет открыт спектральным исследованием...*»³ (подчеркнуто мной. — П. К.). Об элементе четвёртой группы № 32 Менделеев пишет:

«Это будет металл, следующий тотчас за кремнием, и потому назовём его экасилицием. Экасилиций должен обладать атомным весом около $Es = 72$, потому что за ним следует в этом ряду мышьяк. По свойствам своим экасилиций должен обладать свойствами, средними между алюминием и индием. Экасилиций (довольно легко восстанавливаемый из EsO_2 и K_2EsF_6) должен иметь объём около 13, потому что объём кремния = 11, а объём олова = 16. Того же самого результата достигнем, если пойдём в ряду третьем и перейдём от цинка, объём которого равен 9, к экаалюминию, экакремнию и мышьяку, объём которого 14, а потом перейдём к $Se = 18$ и $Bg = 27$. В этом, как и в следующих нечётных рядах, объём последовательно увеличивается начиная с меди до брома, следовательно, свободный экасилиций должен иметь удельный вес около 5,5»⁴.

Нужно не только глубоко знать химию, нужно обладать несокрушимым убеждением во вновь открытый всеобщий закон природы, чтобы с такой ясностью описывать в данных современной науки будущее.

Современники называли Менделеева «Ньютоном химии», Энгельс сравнивал его предсказаниям Лавуазье. Это были очень лестные для того времени сравнения: нельзя было даже подумать, что такая эмпирическая наука, как химия, сумеет достигнуть в своих предвидениях точности предвидений ньютоновской небесной механики. Но мы сейчас знаем, что Менделеев шагнул дальше и глубже проник в суть вещей. Однако об этом будет сказано в другом месте, а сейчас, возвращаясь к истории, посмотрим, как же оправдались предвидения Менделеева.

В 1875 г. Лекок де Буабодран спектральным анализом (т. е. так, как и предвидел Менделеев) открыл элемент галлий, ныне занимающий в менделеевской таблице № 31. Когда Менделеев получил краткое описание свойств элемента, он заявил в Парижскую академию наук, что «способ

¹ Уже этот эпитет «обычный» свидетельствует о том, как глубоко за 10 лет проник метод спектрального анализа.

² Д. И. Менделеев, Периодический закон, стр. 60.

³ Там же, стр. 61.

⁴ Там же, стр. 64.

открытия и выделения, а также немногие описанные свойства заставляют предполагать, что новый металл не что иное, как экаалюминий.

С величайшим напряжением химический мир ждал анализов Лекок де Буабодрана. Сначала у него удельный вес галлия получился 4,7, но после тщательной очистки удельный вес оказался 5,96, атомный вес 69,9, объём 11,7. Эти цифры настолько близко подошли к данным за пять лет до открытия цифрам Менделеева, что Лекок де Буабодран счёл необходимым сказать: «Я думаю, нет необходимости настаивать на огромном значении подтверждения теоретических выводов г. Менделеева относительно плотности нового элемента»¹.

В 1879 г. Нильсон открыл скандий. Сам Нильсон в статье, напечатанной в 1880 г., писал: «следовательно, не остаётся никакого сомнения, что в скандии открыт экабор ... так подтверждаются самым наглядным образом мысли русского химика, позволившие не только предвидеть существование названного простого свойства, но и наперёд дать его важнейшие свойства»².

Через 6 лет последовал новый триумф. В 1885 г. был открыт новый материал аргиродит. Результаты его исследования фрейбергским профессором Винклером привели к выделению нового элемента германия, не совсем чистое и небольшое количество которого было получено Винклером и описано в феврале 1886 г. Немедленно после публикации Винклеру были посланы письма Рихтера, Менделеева и Ле Мейера (каждое письмо шло друг за другом через день 25, 26 и 27 февраля) в написанной последовательности, где указывалось, что германий тождественен с менделеевским экакремнием.

В течение двух лет 1886 и 1888 гг. Винклер тщательно исследовал германий и нашёл, что это металл сероватого цвета, плавящийся при $958^{\circ},5$, с удельным весом 5,35, атомным весом 72,3, атомным объёмом 13,5, теплоёмкостью 0,076. Винклер подробно описал его химические свойства, которые совпали с менделеевскими. О совпадении цифр плотности и объёма можно судить по приведённому выше описанию экасилиция.

Понятно, что Винклер в своей статье о германии писал:

«Если мы имеем дело в германии с замечательным самим по себе элементом, изучение которого доставляет великое наслаждение, то исследование его свойств составляет необыкновенно привлекательную задачу ещё и в том отношении, что задача эта является как бы пробным камнем человеческой проницательности. Вряд ли может существовать более ясное доказательство справедливости учения о периодичности элементов, чем открытие, до сих пор гипотетического «экасилиция»; оно составляет, конечно, более чем простое подтверждение самой теории; оно знаменует собою выдающееся расширение химического поля зрения, гигантский шаг в области познания»³.

Прекрасным подтверждением менделеевского закона явилась и открытие Рамазом группа инертных газов, давшая возможность включить в систему «нулевую» группу — пограничную между щелочными металлами и металлоидами. Сам Менделеев писал об «укрепителях» закона: «Писавши в 1871 году статью о приложении периодического закона к определению свойств ещё неоткрытых элементов, я не думал, что доживу до открытия этого следствия периодического закона, но действительность ответила иначе. Описаны были мною три элемента: экабор, экаалюминий и экасилиций,

¹ Д. И. Менделеев, Периодический закон, стр. 179.

² Там же.

³ Там же стр. 181.

и не прошло 20 лет, как я имел уже величайшую радость видеть все три открытыми и получившими свои имена от тех трёх стран, где найдены редкие минералы, их содержащие, и где сделано их открытие: галлия, скандия и германия. Л. де Буабодрана, Нильсона и Винклера, их открывших, я, с своей стороны, считаю истинными укрепителями периодического закона. Без них он не был бы признан в такой мере, как это случилось ныне. В такой же мере я считаю Р а м з а я утвердителем справедливости периодического закона, так как он открыл He, Ne, Ar, Kr и Xe, определил их

атомные веса, а эти числа вполне подходят к требованиям периодической системы элементов¹.

В заключение коротко остановимся на некоторых моментах развития спектроскопической техники.

Появляются спектроскопы и спектрографы с большой разрешающей способностью. Наряду с применёнными спектроскопами применяются решётки большой разрешающей силы. «До высшего совершенства, — писал П. Н. Лебедев, — конструкцию зеркальных решёток довел американский физик Роуланд (1878 г.). Построив делительную машину, в которой периодические ошёрки в ходе винта так малы, что не могут быть обнаружены точнейшими измерениями, он поместил эту машину на дне глубокой шахты, где постоянство температуры было обеспечено и не

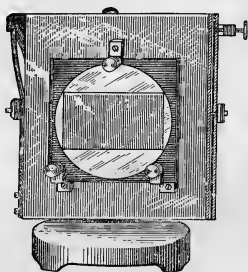


Рис. 61а. Решётка Роуланда

нарушалось самим работающим, так как машина приводилась в действие двигателем и автоматически производила все необходимые движения. Большие решётки Роуланда имеют по 800 бороздок на 1 мм, при длине бороздок в 8 см: общая ширина решётки доходит до 20 см, что составляет 160 000 бороздок². Вогнутая отражательная решётка Роуланда при общей ширине 20 см, числе штрихов 800 на 1 мм и радиусе кривизны 6 м, разделяет, как писал в 1901 г. Лебедев «в спектре первого порядка двойную желтую линию пламени, подкрашенного солями натрия (длина волн которых $\lambda = 0,58962 \text{ м}\mu$ и $\lambda = 0,58902 \text{ м}\mu$) на две линии, расстояние между которыми на фотографической пластинке около 5 мм, так что в солнечном спектре между ними отчетливо видно ещё 11 других фраунгоферовских линий».

Вогнутая решётка обладает тем свойством, что она без всяких труб фокусирует лучи длин волн, удовлетворяющих условию дифракционного максимума: $\sin \varphi = n \frac{\lambda}{d}$, которые исходят из источника, помещённого на окружность диаметра, равного радиусу решётки (рис. 61б) в точках той же окружности. Отсюда вытекает способ наблюдения спектров, показанный на рисунке 61в.

«Два рельса $K_1 K_2$ поставлены под прямым углом, в вершине которого помещена щель S; по этим рельсам может скользить попереч-

¹ Д. И. Менделеев, Основы химии, т. II, Госхимиздат, 1948, стр. 389—390.

² П. Н. Лебедев, Собрание сочинений, М., 1913, стр. 317—318.

ный брусок B , притом так, что концы его всегда двигаются вдоль рельсов; длина бруска B равна радиусу кривизны вогнутой решетки R , которая укреплена на одном его конце, тогда как на другом помещена фотографическая пластинка для снимания спектра или окуляр O для рассматривания его глазом» (Лебедев).

Кроме глаза и фотопластинки, применялись и другие приёмники лучистой энергии, позволяющие количественно оценивать падающую радиацию.

Клеменчич в 1891 г. применил термоэлемент в качестве индикатора электрических колебаний. В 1888 г. Бойс сконструировал радиомикрометр, представляющий гальванометр Дарсонваля, нижняя часть рамки которого представляет собой термоэлемент. В 1898 г. Рубенс

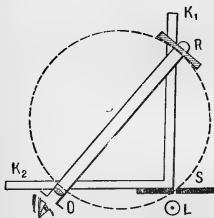


Рис. 61б. К теории решётки Роуланда

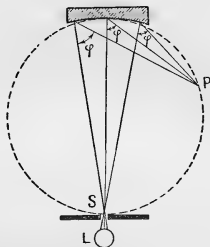


Рис. 61в. К теории решётки Роуланда

изготовил чувствительный термостолбик, состоящий из 20 пар железных и константовых проволок. Этими приборами измерялась весьма слабая радиация. Важный шаг в развитии радиомикрометров был сделан П. Н. Лебедевым, который предложил для увеличения чувствительности термоэлементов к радиации помещать термоэлемент в вакуум. Это был первый вакуумрадиомикрометр (1902).

Ланглей (1883) применил для исследования энергии излучения болометр. Болометр представляет собой тонкую зачернённую проволочку, включённую в одну из плеч мостика Уитстона. Мостик уравнивается, а затем проволочка (или полоска) подвергается действию излучения. Нагревание проволочки радиацией изменяет сопротивление и это изменение является мерой поглощённой радиации.

Ангстрем и Курльбаум предложили в 1893 г. компенсационный метод: две одинаковые проволочки, зачернённые с одной стороны, помещаются рядом. Одна нагревается радиацией, другая электрическим током. При равенстве температур энергии, поглощённые проволочками, очевидно, равны. Радиометры обладают одинаковой чувствительностью для всех длин волны.

В области волн, длиной менее микрона, более чувствительными являются фотоэлектрические и фотографические фотометры. Первый фотоэлемент был сконструирован в 1888 г. А. Г. Столетовым. Это изобретение получило широкое применение в современной технике.

Два направления в теоретической физике.

Открытие Д. И. Менделеева знаменательно и в том отношении, что оно означало поворот в химической науке от эмпиризма и голого описания к глубокому теоретическому исследованию внутренних взаимосвязей.

Основой такого анализа является молекулярно-атомное учение. Химия вступила на путь, предначертанный ещё гениальным Ломоносовым, и это нашло своё выражение в возникновении физической химии. Существенно, что этот поворот в химии не был частным случаем специально химической науки. Переход к новым теоретическим методам, основанным на широком и всестороннем использовании научной гипотезы, произошёл и в физике.

Мы уже отмечали в первом томе, что в XVII в. сложились два направления теоретического естествознания. Первое направление, получившее не совсем точное название ньютоновского, характеризуется стремлением избежать гипотез, широким использованием индукций, математическим описанием экспериментальных фактов. Картезианское направление характеризуется наличием большого числа гипотез, призванных истолковывать, связать эмпирически установленные факты. В основе этого направления лежит мысль о едином всеобъемлющем механизме мироздания, раскрыть который и призвана наука. Коротко говоря, ньютонианцы видели задачу науки в том, чтобы описывать явления, картезианцы в том, чтобы объяснять их с помощью простых предположений о скрытом механизме.

Задача теоретического исследования ньютонианской физики сводилась к установлению из опытных фактов нескольких немногих принципов, к математической формулировке этих принципов и к последующей обработке следствий из них данными математического анализа. Таков, например, был путь Ампера в электродинамике; таково было развитие электростатики и магнитостатики после открытия законов Кулона; такова была теория теплопроводности Фурье. Это направление получило название феноменологического.

Картезианское направление характерно стремлением к моделированию явлений, построению наглядных образов, представляющих данные явления. Такова была вихревая концепция самого Декарта. Сюда же можно отнести силовые трубки Фарадея, вихри В. Томсона. И тот и другой методы страдали односторонностью и ограниченностью. Преувеличенное раздувание односторонних черт того или иного метода приводило к идеалистическим извращениям. Это обстоятельство обозначилось уже в самую раннюю пору развития этих направлений. Ломоносов ясно видел недостатки обоих методов. Поставив перед собой задачу положить основания объяснению мира из него самого, Ломоносов стремился избежать недостатков как крайнего ньютонианства, так и крайнего картезианства. В отличие от ньютонианства, Ломоносов ясно видел силу материалистической гипотезы, базирующейся на твёрдой почве опыта. Гипотеза позволяет глубже вскрывать внутренние связи явлений, не оставаться на внешней поверхности фактов. Но Ломоносов вместе с тем указывал, что один опыт выше тысячи мнений, «рождённых воображением», и этим отмежеввался от неумеренных последователей Декарта. Исходя из тезиса о единстве природы, Ломоносов выдвинул могучую теоретическую концепцию атомистики в качестве основной теоретической базы физики и химии. Наряду с атомами в оптике и электричестве Ломоносов сохраняет концепцию эфира. Фундаментальным принципом всего естествознания Ломоносов считал закон сохранения материи и движения, который был им впервые применён к анализу физических и химических явлений.

В течение XVIII и первой половины XIX в. ньютоновский метод преобладал. Дело было не только в авторитете Ньютона, но и в том, что этот метод был проще и надёжнее. «Формула умнее математика», и математическое описание получало всё большее и большее развитие. Так возникла математическая физика. Задача анализа физического процесса считалась решённой, коль скоро удавалось отразить основные черты этого процесса на языке дифференциальных уравнений. Для того чтобы иметь возможность применять этот язык, процесс и самый физический объект наделялись чертами непрерывности. Так вводились бесконечно малые элементы длины, поверхности, объёма, заряда, тока, массы и т. д. По этой схеме строилась математическая теория упругости, оптика, электричество и магнетизм.

Виднейшим представителем этого направления был кенигсбергский физик Франц Нейман (1798—1895), лекции по математической физике которого («Лекции по теории упругости», 1883; «Лекции по теоретической оптике», 1885; «Лекции об электрических токах», 1884; «Лекции по теории магнетизма», 1881) были ярким примером математического направления в физике.

Такой же характер носят лекции Кирхгофа («Лекции по математической физике. Механика», 1874; «Математическая оптика», 1891; «Лекции по теории тепла», 1893; «Лекции по электричеству и магнетизму», 1891). Широкой известностью пользуется формулировка Кирхгофом задачи математической физики, положенная им в первой части его лекций (механика), которая, по Кирхгофу, состоит в том, чтобы «дать наиболее полное и возможно более простое описание движений, происходящих в природе». Такое описание проводится по рецепту, данному ещё Фурье в его «Аналитической теории тепла»:

«Подобно принципам механики, принципы этой теории выведены из весьма небольшого числа основных фактов, о причине которых математика не спрашивает, рассматривая их как результаты обыкновенных наблюдений, находящих своё подтверждение во всех данных опыта».

Математическая
аналогия.

Успеху феноменологической физики много содействовало то обстоятельство, что она в широкой степени могла использовать математическую аналогию. Одно и то же уравнение могло описывать процессы, относящиеся к различным разделам физики: механика, теплота, оптика, электричество. Таким образом, труд, однажды затраченный математиком, позволял продвинуться сразу в нескольких областях физического знания. На этом обстоятельстве основана спекуляция Маха насчёт «экономического принципа теории познания». Наука, дескать, развивается в соответствии с принципом наиболее экономного описания явлений. На самом деле этот принцип ничего общего не имеет с действительным ходом развития познания. Внешняя аналогия вовсе не означает действительного сходства явлений и нередко приводит к ошибочным заключениям. Познание природы человеком развивается не по принципу «экономия», а в направлении наиболее полного и точного отражения в научных понятиях её объективных законов.

Приведем в связи с этим высказывание известного физика В. Вина по вопросу об «экономическом принципе» Маха:

«Хотя принцип экономии научной работы до известной степени считается само собой разумеющимся в том смысле, что при одинаковой ценности более простую теорию предпочитают более сложной, однако общее значение этого принципа не должно быть переоценено. Он недостаточен в качестве единственной путеводной нити научных исследований».

Теория может быть проста, правильно описывать известную группу явлений и, несмотря на то, оставаться лишенной всякого значения, *если она нас не приближает к познанию законов природы* (подчеркнуто мной.— П. К.). Потому принцип экономии оказывал иногда неблагоприятное влияние на развитие физики.

Нередко объективные законы, проявляющиеся в различных процессах природы, носят общие черты. Так именно обстоит дело в обширной группе физических явлений, носящих название колебаний. Колебательный характер может носить изменение любой физической величины, начиная от механического перемещения и кончая силой тока в контуре. Это открывает возможность единого подхода к этим различным явлениям. На этой основе сложилось отдельное направление в физике — так называемая *физика колебаний*. Её возникновение было связано с возрастанием практического значения колебательных процессов прежде всего в инженерной практике, а в XX в. в радиотехнике. В рассматриваемый период теория колебаний успешно развивалась в связи с акустическими, оптическими и техническими проблемами. Особенно важное значение имела двухтомная «Теория звука» Релея и другие его работы, имевшие для физики колебаний основополагающее значение. Глубокая разработка вопросов теории колебаний, в частности теория резонанса, содержащаяся в трудах А. И. Крылова, посвящена теории качки корабля (1896—1898) и вибрации судов (1901). Важное значение в истории физики колебания имеют «Лекции по сейсмометрии» Б. Б. Голицина. Растущее значение математических методов в физике нашло своё выражение в многократных переизданиях книги Б. Римана и Г. Вебера «Дифференциальные уравнения математической физики», началом которой послужили вышедшие в 1869 г. лекции Римана «Частные дифференциальные уравнения физики». На этой книге воспитывалось не одно поколение физиков. В 1925 г. вышла обширная двухтомная монография коллектива авторов под названием «Дифференциальные и интегральные уравнения механики и физики», изданная Ф. Франком и Р. Мизесом, сменившая классическую книгу Римана и Вебера.

**Теория континуума
и теория
дискретных систем.**

Анализируя историю развития математической физики, А. Пуанкаре (1854—1912) считал, что математическое направление в естествознании, сложившееся в XVIII в., было атомистическим направлением, основанным на концепции центральных сил, действующих как между космическими массами, так и между мельчайшими частицами вещества. Этим и обусловлено, между прочим, то обстоятельство, что основанная на гипотезе частичных центральных сил теория капиллярности включена Лапласом в его фундаментальный труд «Небесная механика». Однако, говорит Пуанкаре, «эта имитация законов небесной механики в физике натолкнулась на непреодолимые трудности и была заменена «физикой принципов». Мы отказались от надежды проникнуть в глубины строения вселенной, от попытки разобрать составные части этой огромной машины, рассмотреть одну за другой управляющие ею силы, мы ограничились тем, что выбрали себе в качестве проводников некоторые общие принципы, назначение которых заключалось в том, чтобы сделать ненужным кропотливое исследование».

Здесь Пуанкаре имеет в виду переход от физики дискретных систем, которая в первой «феноменологической» стадии своего развития имитировала методы небесной механики, к физике континуума — сплошной среды. Труды Релея, Римана и Вебера, упомянутые выше, возникли именно в связи с проблемами физики континуума. Как указывал в своих лекциях по теории колебаний академик Л. И. Мандельштам:

«Физика дала громадный толчок математике. Именно в связи с задачами о колебаниях сплошной среды развились интегральные уравнения, отсюда же возникла теория разложения в ряды Фурье»¹.

Переход от теории системы дискретных частиц к теории континуума является переходом от системы n обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка для функций, характеризующих состояние отдельных точек, к одному дифференциальному уравнению в частных производных для функции двух переменных (в случае одномерной задачи). Теория уравнений в частных производных развилась в связи с проблемами теории сплошной среды.

Самая постановка проблемы сплошных сред (твердых тел, жидкостей или газов) может быть сформулирована трояким образом. Во-первых, как указывает в процитированном выше месте Л. И. Мандельштам: «проще всего разобратъ вопрос с молекулярной точки зрения». Но этот путь невозможен: «потребуется рассчитать задачу о 10^{21} телах!»

«Второй путь заключается в следующем. Мы рассматриваем тела с молекулярной точки зрения. Например, кристалл каменной соли мы рассматриваем как кристаллическую решётку, построенную из ионов хлора и ионов натрия. Но мы можем идеализировать силы и решать задачу так, как будто атомы или ионы в решетке кристалла действуют друг на друга с определёнными квазиупругими силами. Это — некоторый средний путь.

Есть ещё третий путь. Тело рассматривается как сплошное. Считается, что плотность, упругость — непрерывные функции точки. Другими словами, мы идеализируем рассматриваемое тело как сплошное и применяем к нему математический аппарат непрерывных функций»².

Л. И. Мандельштам обсуждает здесь возможности подхода к теории сплошных сред. Вопрос о том, как в действительности развивалась эта теория, его не интересует. Развивались ли указанные три метода одновременно, или в некоторой исторической последовательности, на этот вопрос должна ответить история физики. Мы рассмотрим кратко этот вопрос на примере развития теории упругости.

В первый период своего развития, в эпоху Ньютона—Ломоносова физика сплошной среды развивалась по первому пути. Свойства среды выводились из определённых гипотез о строении и движении частиц. Классическим образцом такого подхода к теории является работа Ломоносова: «Опыт теории упругости воздуха». Наблюдаемый на опыте факт упругости газов, по мнению Ломоносова, «происходит от какого-то непосредственного взаимодействия его атомов»³. Ломоносов не считал упругость свойством, принадлежащим самому атому, он приписывает его коллективу атомов — среде, и ставит задачу вывести это свойство из определенных представлений об атомах и их движении.

Упругость обусловлена отталкиванием атомов друг от друга. Но это отталкивание не есть какие-то феноменологические далекодействующие силы (второй путь!), а в свою очередь нуждается в объяснении из определённой модели молекулярного движения. Здесь Ломоносов гениально устанавливает связь с ещё не оформившейся термодинамикой. Так как опыт показывает, «что при возрастании теплоты воздуха и упругость его всё более усиливается», то «очевидно, что воздушные

¹ Л. И. Мандельштам, Полное собрание трудов, АН СССР, 1950, т. IV, стр. 334.

² Там же, стр. 334—335.

³ М. В. Ломоносов, Соч., т. II, АН СССР, 1951, стр. 119.

атомы действуют друг на друга взаимным соприкосновением сильнее или слабее в зависимости от увеличения или уменьшения степени теплоты, так что, если было бы возможно, чтобы теплота воздуха вовсе исчезла, то атомы должны были бы вовсе лишиться указанного взаимодействия. А отсюда следует, что *взаимодействие атомов воздуха обусловлено только теплотою*¹ (подч. Ломоносовым).

Теплота по Ломоносову заключается во вращательном движении частиц. Приписав атомам шероховатую форму, он приходит к выводу, что вращающиеся атомы при взаимном соприкосновении отскакивают друг от друга, как кубари на льду. Этой, конечно грубой, но интересной моделью (упругость обусловлена взаимодействием вращательных моментов частиц) он объясняет не только упругость воздуха, но и факт убывания плотности атмосферы с высотой.

Но в подходе Ломоносова был тот недостаток, что при тогдашнем уровне научных знаний она открывала широкий простор для произвольных гипотез о природе самих атомов и не давала возможности производить точные расчеты. Поэтому физика пошла по другому пути, пути имитации небесной механики: атомы были заменены силовыми центрами. Представление о материальной точке, лишенной протяженности, но обладающей массой и способной быть центром сил, было введено Эйлером, развито Босковичем, и, именно исходя из этих представлений Навье в 1821 г. получил основные уравнения равновесия и колебаний упругих тел. В этом же году Френель выдвинул гипотезу, что свет является поперечными волнами в упругом эфире. Отсюда возникла проблема изучения распространения волн в упругой среде, которой занялись Коши и Пуассон.

Коши в 1822 г. заложил основы математической теории упругости. Уже в его первой работе был намечен новый подход — (третий путь!). Вместо представления о центральных силах Коши ввел представление об упругих напряжениях в точке, главных осях и главных плоскостях упругости, иными словами ввел для описания упругих свойств твердого тела тензорную величину: тензор упругости. Однако для обоснования этой величины ему пришлось в теории упругости кристаллических сред вновь обратиться к гипотезе о материальных точках — центрах сил. Для характеристики анизотропного тела в теории Коши потребовалась 21 константа.

Вторым методом, т. е. методом модели силовых центров, разрабатывал проблемы теории упругости Пуассон, первая работа которого появилась в 1828 г. Пуассон нашёл два рода волн в упругой среде: продольные и поперечные, отношение скоростей которых равно $\sqrt{3}:1$. Коши применил свои уравнения к вопросу распространения света как в изотропной, так и кристаллической среде (1820). Грин в 1837 г., в работе «О законах отражения и преломления света на общей поверхности двух некристаллических сред» отверг теорию Коши. Критика Грина касалась самых основ теории, и именно его работа послужила исходным моментом перехода к новому этапу теории, теории сплошной среды, базирующейся на немногих исходных принципах.

Вот как Грин формулирует свой метод.

«Как всегда частицы системы масс могут взаимодействовать друг с другом: умножая действующие внутренние силы на дифференциалы соответствующих направлений, получим, что полная сумма для какой-

¹ М. В. Ломоносов, Соч., т. II, стр. 121.

либо части массы всегда будет полным дифференциалом некоторой функции. Если, однако, эта функция известна, то мы можем применить непосредственно указанный в «Mecanique Analytique» общий метод, оказывающийся таким образом применимым к проблеме движения таких систем, которые состоят из необъятного числа взаимодействующих друг с другом частиц. Из преимуществ, коими обладает этот метод, особенно важно то обстоятельство, что мы чистым вычислением с ничтожной затратой труда с нашей стороны приходим с необходимостью ко всем уравнениям и условиям, которые необходимы и достаточны для полного решения любой задачи, к которой мы их прилагаем¹.

Метод Грина замечателен во всех отношениях. Грин не только снял подмости «среднего пути» и перешёл непосредственно к теории континуума, но и применил к этой теории закон сохранения энергии. Введенная им функция — это плотность потенциальной энергии упругой деформированной среды. Грин вывел из принципа сохранения энергии уравнения упругости, содержащие в общем случае 21 константу.

Грин правильно наметил путь, по которому должна идти физика континуума. Его метод получил обоснование в работах В. Томсона (1855), давшим вывод функции Грина из первого и второго принципов термодинамики.

Успехи термодинамики.

Таким образом открытие принципов термодинамики особенно благоприятствовало развитию этого «третьего» направления. Широкая общность этих принципов по-

зволила рассматривать физические и химические процессы, не задаваясь вопросом о структуре той или иной физической системы, о внутренних причинах процессов и получать выводы, дающие возможность сравнения с опытом. Термодинамический метод в руках Гельмгольца, Дюгема, Гиббса и других быстро развивался.

Основная задача теоретиков заключалась на данном этапе в разработке таких математических приёмов, которые позволяли бы с наибольшей эффективностью получать конкретные результаты из общих принципов. Одной из первых работ такого рода была работа Гиббса «Графические методы в термодинамике» (1873), в которой Гиббс обобщает метод диаграмм состояния в координатах объем — давление, используя координаты: энтропия — температура, энтропия — объем, а также логарифмические координаты. Этот приём даёт возможность в ряде случаев быстро и эффективно получать нужные результаты. В качестве примера приведём диаграмму цикла Карно, о которой сам Гиббс пишет: «Заслуживает быть отмеченным, что простейшая форма совершенного термодинамического двигателя, так часто описываемая в учебниках термодинамики, изображается на диаграмме энтропия — температура чрезвычайно простой фигурой — четырехугольником, в котором стороны параллельны осям координат»² (см. рис. 61г).

Площадь этого прямоугольника $ABCD$, равная $(S_2 - S_1)(T_1 - T_2)$, изображает совершаемую работу, площадь прямоугольника $ABFE$, равная $T_1(S_2 - S_1)$ — теплоту, полученную от нагревателя. Коэффициент полезного действия выразится так:

$$\eta = \frac{(S_2 - S_1)(T_1 - T_2)}{T_1(S_2 - S_1)} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

¹ А. Е. Lowe, *Lehrbuch der Elastizität*, 1907, стр. 14.

² Дж. В. Гиббс, *Термодинамические работы*, Гостехиздат, 1950, стр. 40.



Дж. В. Гиббс

В следующей работе «Метод геометрического представления термодинамических свойств вещества при помощи поверхностей» Гиббс развивает результаты первой статьи, представляя связь между величинами, характеризующими термодинамическое состояние вещества (в качестве таковых Гиббс принимает объём, энтропию и энергию) в виде поверхности, которую он называет термодинамической поверхностью для данного тела.

Максвелл высоко оценил этот метод Гиббса, назвав его «чрезвычайно плодотворным», и, собственноручно изготовив гипсовую модель термодинамической поверхности воды, послал ее Гиббсу.

В этой же статье Гиббс делает очень важное примечание, в котором содержится зерно будущего плодотворного метода термодинамического потенциала. Вот это примечание.

«Если мы хотим выразить в одном уравнении необходимое и достаточное условие термодинамического равновесия вещества, когда оно окружено средой с постоянным давлением P и температурой T , то можно записать это уравнение в форме

$$\delta(\epsilon - T\eta + p\nu) = 0$$

(ϵ у Гиббса означает внутреннюю энергию, η — энтропию, обозначения T , p , ν — обычные. — П.К.), где δ означает вариацию, являющуюся результатом любых изменений в состоянии частей тела, и притом (если различные части тел находятся в разных состояниях) в том соотношении, какое соответствует распределению тела между различными состояниями. Условие устойчивого равновесия сводится к тому, что значение выражения в скобках должно быть минимальным»¹.

После этой работы вполне естественным был переход Гиббса к аналитическому методу термодинамики, сущность которого заключалась в введении функций состояния, кроме уже известных энтропии и внутренней энергии. С помощью этих функций можно формулировать условия термодинамического равновесия, подобно тому, как это было сделано Гиббсом в цитированном примечании, или получать новые термодинамические соотношения, используя тот факт, что дифференциалы термодинамических функций являются полными дифференциалами.

Впервые новые термодинамические функции были введены Массье в 1869 г. По этому поводу Гиббс в работе «О равновесии гетерогенных

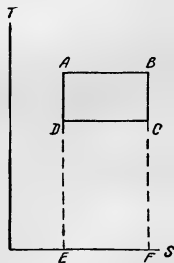


Рис. 61 г.

¹ Дж. В. Гиббс, Термодинамические работы, стр. 80.

систем» пишет: «Massieu («Comptes Rendus», т. LXIX, 1869, стр. 858 и 1067) показал, как все свойства жидкости, «которые рассматриваются в термодинамике», могут быть выведены из одной единственной функции, которую он называет характеристической функцией рассматриваемой жидкости. В цитированной работе он вводит две разные функции этого рода, а именно одну функцию температуры и объёма, которую он обозначает через ψ , значение которой в наших обозначениях будет $\frac{-\varepsilon + t\eta}{t}$ или $-\frac{\psi}{t}$, и другую функцию от температуры и давления, которую он обозначает через ψ' , значение которой в наших обозначениях будет $\frac{-\varepsilon + t\eta - p\nu}{t}$ или $-\frac{\xi}{t}$. В обоих случаях он рассматривает постоянное количество (один килограмм) неизменной по составу жидкости».

Процитированная работа Гиббса «О равновесии гетерогенных систем», опубликованная в ряде статей 1875—1878 гг., является фундаментальной работой в истории развития термодинамических методов. Здесь Гиббс рассматривает условия термодинамического равновесия системы, состоящей из произвольного числа компонент и фаз. Фаза является характеристикой только состава и термодинамического состояния тела, безотносительной к его величине и форме. Гиббс указывает, что «мы считаем все тела, отличающиеся друг от друга только количеством и формой, равными образцами одной и той же фазы».

Применяя метод термодинамического потенциала, Гиббс выводит условие равновесия системы, состоящей из n независимых компонент («независимо изменяющихся составных частей») и из r с о с у щ е с т в у ю щ и х фаз. Последний термин Гиббс определяет следующим образом: «Фазы, могущие существовать совместно с плоской поверхностью раздела и равновесие которых не обусловлено пассивными сопротивлениями, мы будем называть с о с у щ е с т в у ю щ и м и». Из полученных уравнений равновесия Гиббс выводит своё известное правило фаз: «Число независимых изменений фаз системы будет $n + 2 - r$ ». Так, например, для однокомпонентной системы с одной фазой число независимых изменений равно 2. Такая однородная система характеризуется двумя независимыми переменными, например объёмом и температурой. Состояние термодинамического равновесия двух фаз однокомпонентной системы характеризуется одной переменной (например, температурой). Далее для однокомпонентной системы возможно только единственное состояние равновесия трёх фаз (тройная точка).

В дальнейшем метод термодинамических функций развивался следующим образом. Гельмгольц (1882) ввел представление о свободной энергии $F = U - TS$, являющейся мерой максимальной работы, совершаемой системой при изотермических процессах. Пользуясь этой функцией, Гельмгольц расширил область применения термодинамики, рассмотрев термодинамическую теорию гальванического элемента.

В мемуаре «О термодинамике химических процессов» он формулирует принцип свободной энергии в следующих выражениях: «... мне кажется несомненным, что также в химических процессах следует проводить различие между частью сил химического сродства, способной к свободному превращению в другие формы работы, и той частью, которая порождает только теплоту. Я позволю себе обе части энергии обозначить ... как свободную и связанную энергии» («Научные сочинения», т. II, стр. 958).

Дюгем в 1886 г. назвал функцию Гельмгольца, обозначенную Гиббсом ψ и равную $\psi = U - TS$, термодинамическим потенциалом при постоянном объёме, а функцию, обозначенную Гиббсом через ζ и равную $\zeta = U - TS + pv$, термодинамическим потенциалом при постоянном давлении.

В 1894 г. Н. А. Умов обобщил выражение термодинамического потенциала, введя интегрирующий множитель $\frac{1}{\theta}$ в выражение работы, так что $d\omega = \theta dZ$, где dZ — полный дифференциал.

Тогда термодинамический потенциал Умова будет иметь вид

$$\Phi = U - TS + \theta Z.$$

С помощью первого начала нетрудно показать, что

$$-S = \frac{\partial \Phi}{\partial T}, \quad Z = \frac{\partial \Phi}{\partial \theta}$$

и, следовательно,

$$\Phi = U + T \frac{\partial \Phi}{\partial T} + \theta \frac{\partial \Phi}{\partial \theta}.$$

Рассмотрением термодинамических потенциалов и уточнением математической формулировки принципов термодинамики занимался Н. Н. Шиллер.

В 1887 г. Планк дал термодинамическую теорию разведённых растворов. Теория Планка была основана на принципе возрастания энтропии в замкнутой системе, из которого и вытекает, в частности, найденное Гиббсом условие термодинамического равновесия для систем, находящихся при постоянных давлении и температуре. «Как глубоко охватывает этот принцип — говорил Планк в своей лекции о теории растворов — все физические и химические отношения, на это лучше и полнее других было указано Джосиа Виллардом Гиббсом, одним из наиболее знаменитых теоретиков всех времен, и не только Америки, но и всего мира»¹. Планк указывал, что в его лекции освещаются некоторые важные приложения, в которых термодинамическое исследование дало полученным Гиббсом результатам дальнейшее развитие.

Успехи термодинамики были, таким образом, успехами физики общих принципов, назначение которых заключалось в том, чтобы сделать ненужным кропотливое исследование.

**Возникновение
теоретической
физики.**

Сейчас спустя более полувека после написания Пуанкаре приведённых выше (на стр. 90) строк особенно отчётливо ощущается непонимание им истинного направления процесса развития физики в эту переломную эпоху. Новое в развитии теоретической физики как раз и состояло в том, что феноменологическое описание оказывалось недостаточным, что физика вынуждена была глубже проникнуть и в природу вещества и в природу электромагнитных сил, чем это возможно было для феноменологической физики. Вместе с усложнением задач физики усложнялись и развивались не только её экспериментальные методы, но и теоретические. *Выражением этого факта является возникновение теоретической физики, как отдельной ветви физической науки.*

Ещё в 80-х годах, как указывал Планк в своей автобиографии, теоретическая физика не существовала как самостоятельная отрасль физики. Когда в 1889 г. он получил предложение занять в Берлине кафедру, осво-

¹ Макс Планк, Теоретическая физика. Восемь лекций, читанных в Колумбийском университете в 1909 г., М., 1911, стр. 31—32.

бодившуюся после смерти Кирхгофа, исполняя сначала должность экстраординарного, а с 1892 г. ординарного профессора теоретической физики, то это назначение рассматривалось его коллегами как нечто необычное:

«Я был тогда, повидимому, единственным теоретиком, — вспоминает Планк, — до известной степени физиком *suí generis*, и это сделало мне вступление в должность совсем не легким. Я совершенно ясно чувствовал, что мои ассистенты по физическому институту встречали меня с определённо подчеркнутой сдержанностью»¹. Но эта сдержанность в конце концов уступила место признанию значения теории в современном физическом исследовании. Это признание было получено в результате блестящих успехов теоретической мысли, о которых мы будем говорить ниже. Эти успехи были достигнуты не пассивным «описанием», а в результате стремления более глубоко и полно отразить реальные взаимосвязи явлений. «Я держусь того мнения, — говорил Л. Больцман, один из виднейших теоретиков этого периода, — что задача теории заключается в конструировании существующего исключительно в нас отражения внешнего мира, которое должно служить путеводной звездой во всех наших мыслях и экспериментах...»².

Протягивая нить от первых фантастических отражений вселенной древними натурфилософами, до позднейших великих теорий — «теории Коперника, атомистики, механической теории невесомых веществ, дарвинизма и т. д.», созданных в то время, когда «вступили в права трезвый экспериментирующий рассудок и умение обращаться со множеством изобретённых аппаратов и машин». Больцман, указывает, что теоретические представления «поразительно выиграли в значении и точном отображении природы, и теперь можно сказать, что теория покорила мир». Таким образом творческая, теоретическая абстракция стала могущественной силой. «И чем абстрактнее теоретическое исследование, тем оно могущественнее», — утверждает Больцман. В мощи теории заключается и её величайшее практическое значение. «Бруклинский мост, необозримо простирающийся в длину, и Эйфелева башня, беспредельно простирающаяся к небу, покоятся не только на твёрдом фундаменте из чугуна, но ещё и на более твёрдом — теории упругости»³. Но в абстракции содержатся и гносеологические корни идеалистических ошибок. Больцман задаёт вопрос, как избежать, «чтобы при постоянном углублении в теорию её образ не начал казаться собственно бытием». Так, Гегель сожалел, что природа не осуществляет полностью его философской системы; аналогичное может случиться и с математиком, «когда он, непрерывно занимаясь своими формулами, бывает ослеплён их внутренним совершенством, начинает считать собственно сущим их взаимоотношения друг к другу и отворачивается от реального мира»⁴. Именно в такую ошибку впали энергетики, объявившие энергию чистым символом, из которого выводятся все физические явления. Такое возведение символа в ранг «собственно сущего» ни к чему хорошему не приводит.

Подводя в 1918 г. итоги борьбы идеалистической энергетики и материалистической атомистики, В. Вин указывал: «Как раз в последние годы атомистика повела к величайшим успехам, тогда как энергетика осталась бесплодной»⁵. Бесплодие энергетики, как и других идеалистических систем, вырастающих на живом дереве могучего человеческого знания, и обуслов-

¹ Max Planck, Wissenschaftliche Selbstbiographie, 1948, стр. 23.

² Л. Больцман, Очерки методологии физики, М, 1929, стр. 31—32.

³ Там же, стр. 33.

⁴ Там же, стр. 34.

⁵ В. Вин, Новейшее развитие физики, М, 1922, стр. 67—68.

лено тем отрывом от конкретной действительности, о которой говорил Больцман. Материалистически настроенные естествоиспытатели, наоборот, постоянно имели в виду мост между теорией и практикой, отражением и отражаемой вещью.

«Все явления природы объясняются двумя понятиями — веществом и его движением», — писал известный химик Рамзай. Слово «объяснять» может быть понимаемо только в том смысле, что только тогда малейшие явления природы становятся ясными, когда мы можем представить их себе как аналогичные тем, которые мы исследуем при помощи наших сознательных или бессознательных чувств¹.

Вот на этом пути непрерывного обращения к чувственному, вещественному миру, широко используя материалистические гипотезы, теоретическая физика конца XIX и начала XX в. и добилась поразительных успехов, изменивших наше представление о физическом мире. Она открыла два новых объекта физического исследования: поле и атом. В тесном взаимодействии с экспериментом, который сам становился всё более «теоретизированным», с практикой, которая всё более и более нуждалась в глубокой теоретической основе, развивалась и углублялась физическая теория, претерпевшая революционные изменения, вынужденная всё более полно и глубоко отражать диалектику реального мира.

Первым и важнейшим результатом развития теоретической физики следует считать возникновение теории электромагнитного поля Максвелла. Именно здесь впервые обнаружилось превосходство нового углублённого подхода к физическим явлениям. Формальные теоретические схемы Неймана, Вебера и др. привели электродинамику в такое состояние, которое Гельмгольц назвал «хаотическим царством».

«Результаты наблюдений и выводы из теории подводились под одну рубрику и не были достаточно разграничены друг от друга», — так характеризовал Гельмгольц переплетение эмпирии и голого формализма в электродинамике. Заслуга Максвелла состояла в том, что он вывел электродинамику из этого хаоса, сосредоточив внимание теории на новом объекте — электромагнитном поле. Стало трюизмом в истории науки говорить о непонимании теории Максвелла его современниками, о том, что «Трактат» Максвелла был «книгой за семью печатями» для физиков того времени, но обычно это непонимание относят к методу Максвелла, к способу его изложения и т. д., которое собственно обуславливает не п р и з н а н и е теории Максвелла современниками. Последовавшее после опытов Герца п р и з н а н и е теории Максвелла рассматривалось как эквивалент понимания его теории. На самом деле подлинный смысл теории Максвелла раскрывается только в наши дни, и можно думать, что сам Максвелл ещё не вполне ясно представлял значение своего открытия. Тем более это значение не понималось в должной мере его современниками и преемниками. Ф. Клейн и А. Пуанкаре считали теорию Максвелла вершиной математической физики, завершением линии Вебера, Неймана и Кирхгофа.

Но теория Максвелла отнюдь не математическая теория. Это — глубоко физическая теория, открывшая для науки структуру электромагнитного поля. В отличие от теории Вебера-Неймана, примыкавшей к направлению физики дискретных систем, теория Максвелла примыкала к направлению физики континуума. Ее появление имело столь важные научные и практические последствия и вместе с тем так глубоко пропизывало всю историю физики последнего тридцатилетия XIX в., что мы будем изучать подробно его историю в последующих главах.

¹ В. Рамзай, *Элементы и электроны*, М, 1926, стр. 6.

Кинетическая
теория материи

Вторым завоеванием теоретической физики конца XIX в. следует считать кинетическую теорию материи и статистическую механику. Оно было тесно связано с тем направлением физической мысли второй половины XIX в., которое известно под названием механического миропонимания. Открытие закона сохранения и превращения энергии позволило все виды энергии количественно оценивать в механических единицах и тем самым, естественно, наталкивало на мысль о сведении всех явлений природы к механическим. «Если вы меня спросите, — говорил в 1886 г. Больцман, — относительно моего глубочайшего убеждения, назовут ли нынешний век железным веком или веком пара и электричества, я отвечу, не задумываясь, что наш век будет называться веком механического миропонимания, веком Дарвина»¹. Так объединяет Больцман сделавшее эпоху в науке о жизни открытие Дарвина с успехами кинетической теории материи. Механическое миропонимание ставило своей задачей объяснить все явления природы при помощи двух основных понятий — вещества и движения (механического). Ещё Ломоносов с успехом объяснял тепловые явления движением нечувствительных частичек. После открытия закона сохранения энергии идея Ломоносова разрабатывалась многими физиками, в особенности Клаузиусом и Максвеллом. Новое развитие атомистики связано с именами Л. Больцмана, Н. Пирова, В. Гиббса. Замечательно (такова диалектика познания), что крушение механического миропонимания было обусловлено прежде всего его успехами. Последовательное проведение программы механической атомистики выдвинуло задачу более глубокого анализа взаимосвязи механических закономерностей, отражаемых дифференциальными уравнениями механики, и специфических закономерностей термодинамики, что привело к необходимости введения в физику статистических закономерностей. С другой стороны, «каждое поколение, от самого раннего рассвета науки до наших дней, всегда посвящало должную долю своих интеллектуальных сил на разрешение вопроса о последнем атоме» (Максвелл), и именно в конце XIX в. этот вопрос перешёл в новую фазу — учения о неисчерпаемом атоме.



Л. Больцман

Здесь следует ещё раз подчеркнуть, что успехи теоретической физики как в области теории поля, так и в области теории вещества самым тесным образом связаны с прогрессом экспериментальной техники. Физика улавливает истину с помощью самых разнообразных аппаратов и приборов, непрерывно совершенствующихся и усложняющихся. «Я смотрю на них, — говорил по поводу физических приборов Больцман, — не только как на аппараты, устроенные для того, чтобы, видоизменив силы природы, заставить их служить нам; нет, я вззираю на них с большим благоговением, ибо

¹ Л. Больцман, Очерки методологии физики, стр. 38.

я вижу в их устройстве действительное средство к тому, чтобы разоблачить сущность вещей»¹.

Проникая всё глубже и глубже в сущность вещей, человек преодолевает несовершенство своих чувств, открывая формы движущейся материи, непосредственно не воспринимаемые чувствами. Такие открытия являются триумфом науки, триумфом диалектического материализма, ибо они доказывают существование объективной реальности, существующей независимо от наших ощущений. Таким открытием было открытие электромагнитных волн Герцем, которые существовали в природе и до опытов Герца, но не воспринимались нами в наших ощущениях. Эти волны были открыты более чем за 20 лет до опытов Герца теорией Максвелла. Теория и эксперимент дали возможность проникнуть в мир «нечувствительных частиц», в объективном существовании которого был убеждён Ломоносов. И хотя махисты и энергетики третировали атомно-молекулярное учение как «почтенный шабаш ведьм», призывая науку ограничиться описанием чувственных переживаний, подлинная наука упорно исследовала и теоретически и экспериментально этот недоступный непосредственно чувствам мир.

Определение молекулярных размеров.

Последнее тридцатилетие XIX в. отмечается напряжённой работой по определению молекулярных констант (размеров молекул, их числа и массы и т. д.). Уже Ломоносов производил определения верхних пределов размеров частиц, опираясь на наблюдения растворимости, расплющивания кусочков металла в тонкие листки и т. д. Эти определения продолжались и в XIX в.

Из наблюдений запахов Фишер и Пенцольдт установили, что для молекул этилового мерпантина диаметр меньше 1,3 μ ; Гельмгольц, определяя наименьшую границу различимости глазом предметов, оценил размеры молекул наименьшими одного микрона. Наблюдая окраску жидкого индиго в растворе, Паррот определил, что диаметр молекул должен быть меньше 0,8 μ . Бойс, изготавливавший тончайшие кварцевые нити для чувствительных крутильных аппаратов, определил, что диаметр молекул кварца должен быть меньше 0,8 μ . Де ля Рю, расплющивая тонкие листочки золота, снизил границу до 0,1 μ . Фарадей, изготавливая тончайшие плёнки золота, показал, что диаметр атомов золота должен быть меньше нескольких миллимикрон. Для мыльных плёнок Рейнольд и Рюкер определяли границу в 11 μ .

За этими подсчётами, основанными на непосредственных наблюдениях, последовали определения верхней границы размеров молекул косвенным путём. Гельмгольц из определения разрешающей способности микроскопа установил, что $d < 0,2\mu$, Кирхгоф и Бунзен из спектрального анализа определили для натрия $d < 2\mu$. Квинке, определяя угол соприкосновения воды со стеклом, нашёл, что для стекла $d < 0,05\mu$. Релей, наблюдая движение камфоры на воде, снизил границу для молекул масла до 1,6 μ . В. Томсон, наблюдая контактную электризацию, установил для окислов металлов, что $d < 1,2 \mu$, а Винер, изучая поляризацию отражённого от серебряной поверхности света, снизил границу до 0,2 μ .

Но все эти экспериментальные определения пока что могли дать только верхнюю границу, т. е. число, превышающее размеры молекулы. Подойти ближе к определению размеров молекулы и в некоторых случаях оценить нижнюю границу этих размеров позволила теория. Здесь прежде всего рас-

¹ Л. Больцман, Очерки методологии физики, стр. 41.

смотрим подсчёты В. Томсона, произведённые им в 1870 и 1871 гг. различными методами. В 1870 г. Томсон подсчитывал изменение поверхностной энергии водяной плёнки при её растяжении. Чтобы увеличить изотермически поверхность водяной плёнки на 1 кв. мм, требуется затратить работу 12 мГ·мм. Для того чтобы 1 куб. мм воды растянуть при постоянной температуре в плёнку толщиной в 1 м μ (10^{-6} мм), придётся затратить работу $12 \cdot 2 \cdot 10^6 = 24 \cdot 10^6$ мГ·мм. Чтобы обратить 1 куб. мм при $t = 20^\circ$ в пар, надо затратить $\frac{540 + 80}{10^3} = 620 \cdot 10^{-3}$ кал =

$= 263 \cdot 10^3$ кГм. При растяжении плёнки при $t = 20^\circ$ С на толщину в $\frac{1}{10}$ м μ потребуется энергия того же порядка ($240 \cdot 10^{-3}$ кГм), а на $\frac{1}{20}$ м μ — превышающая энергию испарения ($480 \cdot 10^{-3}$ кГм).

«Неизбежное заключение отсюда, — пишет Томсон, — что у водяной плёнки значительно понижается стягивающая сила прежде, чем плёнка дойдёт до $2 \cdot 10^{-7}$ мм толщины. Какую бы мы молекулярную теорию ни допускали, едва ли возможно, чтобы могло быть какое-нибудь значительное понижение стягивающей силы до тех пор, пока в толще плёнки ещё заключается много молекул. Поэтому вероятно, что в толще воды в 10^{-7} мм не находится много молекул»¹. Томсон приходит к выводу, что диаметр молекулы воды должен быть во всяком случае больше 0,05 м μ ($5 \cdot 10^{-8}$ мм).

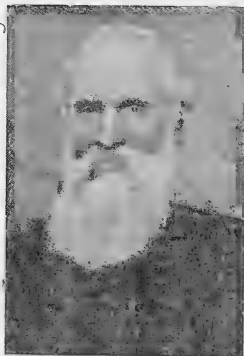
В 1872 г. Стефан, анализируя эти же отношения, высказал положения: «Увеличение поверхности жидкости на величину, равную сечению одной молекулы, требует такой же затраты энергии, как и обращение в пар одной молекулы». Отсюда он вычислил диаметр молекулы воды, найдя его равным

$$d = 0,06 \text{ м}\mu.$$

В. Томсон подошёл к определению наименьшего предела диаметра молекулы и другим путём. Он полагал, что существование явления контактной разности потенциалов является «доказательством существования предела предполагаемой малости молекул». Пусть соприкасаются медный и цинковый листочки, площадью каждый в 1 кв. см и толщиной 10^{-5} см. Если толщина выступов на листках порядка их толщины, то сила электрического прикосновения, возникающая при контактной электризации, будет равна 2Г, а затраченная работа

$$2 \cdot 10^{-5} \text{ Г}\cdot\text{см}.$$

При образовании столбика в 2 см высотой ($5 \cdot 10^4$ — пар медных и цинковых листков), вес которого будет 8 Г, на каждый грамм будет произве-



В. Томсон

¹ Цит. по статье Б. П. Вейяберга, О величине молекул, журн. «Вестник опытной физики и элементарной математики», 1894.

дено $\frac{2 \cdot 10^{-5} \cdot 10^5}{8} = \frac{1}{4} \Gamma \cdot \text{см}$ работы. Если эти листочки сделать в 1000 раз тоньше, то энергия возросла бы в 10^6 раз и при обращении её в теплоту могла бы расплавить латунь. Отсюда Томсон делает заключение, что «действие электричества при соприкосновении прекращается или не продолжает возрастать по тому же закону, когда деление металлов доведено до чего-нибудь вроде 10^{-8} см ». «Таким образом мы не можем довести деление цинка и меди ниже известной толщины, не приведя их тем самым в условия, в которых они теряют свои свойства как самостоятельные твёрдые металлы». Этим определяется нижняя граница размеров атомов меди и цинка

$$d > 0,025 \text{ мр.}$$

«Таким образом, — заключает В. Томсон свою статью «О величине атомов», — мы можем в настоящее время быть вполне уверены в том, что диаметр молекулы и десятиллионные доли миллиметра — величины, очень близкие между собой». Эти умозаключения Томсона Больцман назвал гениальными.

Новые методы определения размеров молекул дала кинетическая теория газов. Как отмечал Больцман, «благодаря атомистической гипотезе удалось заранее вычислить зависимость постоянного трения газа от температуры, вычислить абсолютное и относительное значения постоянной диффузии и теплопроводности. Эти предсказания мы, конечно, можем поставить наравне с открытием, на основании вычислений планеты Нептуна, сделанных Леверрье, и с предсказанием конической рефракции Гамильтоном»¹.

Эти предсказания молекулярно-кинетической теории позволили дать оценку таким константам молекулярного мира, как длина свободного пробега и число соударений в секунду. Уже в 1865 г. Лошмидт воспользовался этими данными для определения диаметра и числа молекул. По оценке Лошмидта, $d = 1,13 \text{ мм}$.

В 1873 г. вышла диссертация Иоганна Дидерика Ван-дер-Ваальса «О непрерывности газообразного и жидкого состояния», в которой он с молекулярной точки зрения анализировал отступления от законов идеального газа и ввёл поправки на сцепление молекул и их объём (на необходимость поправки на молекулярный объём указал ещё Ломоносов). Как известно, уравнение Ван-дер-Ваальса, содержащее эти поправки, имеет вид

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT.$$

Поправка b характеризует молекулярный объём

$$\frac{4}{3} \pi \rho^3 N = kb.$$

Здесь ρ — радиус молекулы, N — число молекул в грамм-молекуле (число Авогадро), k — коэффициент, который различные авторы оценивали по-разному. В рассматриваемое нами время (конец XIX в.) наиболее достоверным значением для k считалось $k = \frac{1}{4\sqrt{2}}$. По измерениям Реньо $b = 0,00197$;

¹ Л. Больцман, Очерки методологии физики, стр. 41.

молекулярный объём Лошмидт определял из соотношения

$$\frac{4}{3} \pi r^3 N = \frac{\delta}{\Delta},$$

где δ — плотность газа, Δ — плотность сжиженного газа. Для воздуха, по Реньо, $\delta = 0,001293$ и $\Delta = 0,933$ (по Ольшевскому). Отсюда $r = 0,14$ мк, $d = 0,28$ мк.

Развивая идеи Моссотти, Клаузиус построил молекулярную теорию диэлектриков. Из теории Клаузиуса-Моссоти получается соотношение

$$\frac{4}{3} \pi r^3 N = \frac{K - 1}{K + 2},$$

где K — диэлектрическая постоянная. По закону Максвелла,

$$K = n^2,$$

и, следовательно,

$$\frac{4}{3} \pi r^3 N = \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2}.$$

По измерениям Больцмана для воздуха $K = 1,00059$, по измерениям Маскара $n = K^2 = 1,000588$, что даёт для диаметра молекулы $d = 0,16$ мк.

Конечно, в свете успехов современной электронной и атомной экспериментальной техники все эти результаты кажутся весьма скромными. Но их историческое значение огромно. Они вооружали духовно естествоиспытателей, вторгающихся в мир атомно-молекулярных явлений, верой в конечный успех, что было особенно важно ввиду яростных атак сторонников «чистого описания». Они давали опорные пункты теории, смело оперирующей «нечувствительными частичками». Глубоко прав был русский физик Б. П. Вейнберг, который в 1897 г., заканчивая обзор попыток определения «величины атома», писал:

«Не твёрдыми шагами, но уверенно идёт наука к раскрытию тайн этого недоступного никакому микроскопу мира молекул и теперь уже может... с достаточной точностью измерить, взвесить и сосчитать эти молекулы, обнаруживая в этом случае, может быть ярче, чем в других, свою поразительную мощь и могущество».

**Статистика
Больцмана.**

После Максвелла и Клаузиуса теоретическая разработка атомистики с большим успехом проводилась австрийским физиком Людвигом Больцманом (1844—1906). Больцман рассматривал модель газа, представляющую совокупность частиц, взаимодействующих между собой быстро убывающими с расстоянием силами или даже просто с силами, действующими только во время контакта, аналогичными силам удара. Взаимодействия частиц при контакте подчиняются законам сохранения импульса и энергии (упругий удар). В результате действия механических законов для совокупности частиц, образующих газ с заданным полным значением энергии, устанавливается определённое распределение по состояниям, не меняющееся, несмотря на непрерывно продолжающиеся столкновения частиц (распределение Больцмана). Законы этого распределения следующие:

1. В отсутствии внешнего силового поля молекулы газа распределяются по объёму равномерно.

2. «В отдельном газе не все молекулы обладают точно одинаковой скоростью, но некоторые из них обладают скоростью, гораздо большей, а некоторые гораздо меньшей, чем средняя, и Максвелл первый указал, что

различные скорости распределены точно так же, как ошибки наблюдения, постоянно вкрадывающиеся, когда мы одну и ту же величину определяем посредством измерения при одних и тех же обстоятельствах».

3. В силовом поле молекулы распределяются неравномерно, а преобладающая часть их будет находиться в состоянии, отвечающем минимуму потенциальной энергии, причём доли молекул, обладающих значениями энергии, отличными от минимального, убывают по показательному закону.

Таким образом, из атомистических представлений получаются макроскопические законы газового состояния (уравнение Клапейрона, барометрическая формула). Но атомистика — это образ системы дискретных частиц. Каким же способом это представление может быть совместимо с методом описания системы дифференциальными уравнениями? Как известно, такое описание связано с идеей непрерывного и соответствует представлению о теле, как континууме. Больцман указывает, что группу фактов мы описываем не непосредственно, а посредством определённых представлений — образов. Такими представлениями могут быть как понятия математики, так и отчасти атомистики. Важно только, чтобы в эти образы входило как можно меньше произвольного. Если это выполнено, то нельзя говорить, что дифференциальные уравнения менее произвольно описывают факты, чем атомистика. «Я думаю, — говорит Больцман, — что утверждение, будто бы дифференциальные уравнения менее выходят за пределы фактов, чем самая общая форма атомистических взглядов, основывается на порочном круге. Если кто-нибудь с самого начала придерживается взгляда, что наши восприятия могут быть представлены образом континуума, то, без сомнения, за пределами предвзятых взглядов окажутся не дифференциальные уравнения, а атомистика. Совсем иначе будет обстоять дело, если мы привыкли мыслить атомистически; тогда, наоборот, выходящим за пределы фактов окажется понятие о континууме»¹.

Больцман указывает, что само дифференциальное уравнение, должноствующее отражать идею континуума, «является лишь выражением того, что сперва надо мыслить конечное число»².

«Когда я объявляю дифференциальное уравнение или формулу, содержащую определённые интегралы, самым целесообразным представлением, я предаюсь иллюзии, думая, что я удалил из моего мышления атомистические идеи, без которых понятие предела является бессмысленным; я только утверждаю дальше, что различия между фактами и значениями пределов никогда не будут наблюдаемыми, как бы ни уточнялись наши средства наблюдения... Атомистика неотделима от понятия континуума. Лаплас, Пуассон, Коши и др. исходили из атомистических взглядов, очевидно, потому, что тогда было еще более ясно осознано, что дифференциальные уравнения являются только символами атомистических представлений»³.

Надо заметить, что в это время проблема связи «атомистики» рациональных чисел с «континуумом» всех вещественных чисел усиленно разрабатывалась математиками (Дедекинд, Кантор), которые указали, каким образом из понятия дискретных чисел конструируется непрерывное множество вещественных чисел, понятие континуума. И подобно тому, как в математике обращение к дискретному числу способствовало

¹ Л. Больцман, Очерки методологии физики, стр. 94.

² Там же, стр. 95.

³ Там же, стр. 96.

углублению и развитию понятия непрерывности, в физике атомистика способствовала углублению и развитию физики континуума.

«Точно так же, как дифференциальные уравнения представляют лишь математический метод вычисления и их подлинный смысл можно понять только с помощью представлений, основанных на большом конечном числе элементов, наряду с общей термодинамикой и не умаляя ее важности, которая никогда не может поколебаться, развитие механических представлений, делающих ее наглядной, способствует углублению нашего познания природы, причем не вопреки, а именно благодаря тому, что они не во всех пунктах совпадают с общей термодинамикой, они открывают возможности новых точек зрения»¹. Эти новые точки зрения заключаются в том, что переходы системы из одного состояния в другое подчиняются законам теории вероятностей.

Введение теории вероятностей в рассмотрение механических систем (а частицы тела в теории Больцмана подчиняются законам механики) кажется противоречием. Динамическая закономерность, с которой имеет дело механика, представлялась настолько определённой, что уже Лаплас считал, что если бы уму было доступно знание расположения всех частиц Вселенной в данный момент и сил, действующих между ними, то он при наличии у него способности к математической обработке этих данных смог бы с достоверностью предвидеть будущее Вселенной, равно как и усмотреть её прошлое. Каким же образом законы механики в кинетической теории приводят к статистике? Больцман отвечает на этот вопрос: причина статистики заключена в самой механике, в начальных условиях. Ничтожные шероховатости стенок сосуда, о которые ударяются молекулы газа, достаточны, чтобы внести хаос в первоначальный порядок, если бы он имел место. Законы сохранения при соударении двух молекул оставляют полный простор для направлений скоростей после удара. Всё это приводит к тому, что именно вследствие механических взаимодействий молекул упорядоченное их движение становится невероятным, а хаотическое наиболее вероятным.

Развитие этого хода мыслей привело Больцмана к новой точке зрения на второй закон термодинамики. Этот закон Больцман формулирует следующим образом: «Когда произвольная система тел будет предоставлена самой себе и не подвержена действию других тел, то всегда может быть указано направление, в котором будет происходить каждое изменение состояния». Это направление может быть характеризовано изменением некоторой функции состояния — энтропией, которая изменяется с изменением состояния системы в сторону возрастания. Отсюда вывод, «что всякая замкнутая система тел стремится к определённому конечному состоянию, для которого энтропия будет максимум!»

Как же примирить эту направленность с обратимостью уравнений механики? Действительно ли природа неумолимым роком приближается к своему естественному концу «тепловой смерти»?

Больцман впервые дал статистическую интерпретацию второго закона, вскрыл его вероятностный характер. Противоречия между обратимостью уравнений механики и необратимостью процессов в замкнутой механической системе нет. Представим себе барабан, заполненный наполовину белыми и наполовину чёрными шарами, лежащими одни поверх других. Если привести барабан во вращение, то в силу механических законов шары будут перемешиваться и в конце концов белые и чёрные шары перемешаются

¹ Л. Больцман, Лекции по теории газов, Гостехиздат, 1954, стр. 524.

равномерно, дадут во всём объёме одинаковую «пестроту». Совокупность шаров перешла из менее вероятного состояния в более вероятное.

Отметим здесь ломоносовскую идею необходимости «шероховатости» для возникновения хаотического перемешивания. Приведём в связи с этим высказывания Планка: «Я бы хотел обратить внимание тех физиков, которые тем не менее считают гипотезу элементарного беспорядка излишней или даже необоснованной, на тот факт, что при всех вычислениях постоянных в явлениях трения, диффузии, теплопроводности из молекулярно-кинетических соображений явно или неявно допускается элементарный беспорядок и что поэтому с принципиальной точки зрения правильное явно поставить это условие, чем его игнорировать, или скрывать. Кто же, однако, считает гипотезу элементарного беспорядка само собой очевидной, пусть имеет в виду, что по теореме Пуанкаре, доказательств которой приводить здесь не место, в пространстве, окруженном со всех сторон абсолютно гладкими стенками, навсегда исключается справедливость этой гипотезы, — следствие которой могло бы иметь роковое значение, но ведь в природе абсолютно гладких стенок не существует»¹.

Необратимые процессы в природе, по Больцману, есть процессы перехода из менее вероятного состояния в более вероятное. Обратимые переходы не возможны, а мало вероятны. Поэтому и энтропия должна быть связана с вероятностью данного состояния системы. Эта связь была установлена Больцманом в его так называемой H -теореме. Мы приведем здесь соображения, принадлежащие Планку, которыми обосновывается эта связь.

Пусть некоторая система находится в состоянии, вероятность осуществления которого ω , а энтропия s . Согласно предположенной связи между s и ω , энтропия должна быть функцией вероятности $s = f(\omega)$. Пусть эта система состоит из двух подсистем, так что приведение её в данное состояние осуществляется переходом первой подсистемы в состояние с энтропией s_1 и второй подсистемы в состояние с энтропией s_2 . Вероятности осуществления обоих состояний соответственно равны ω_1 и ω_2 . При этом $s_1 = f(\omega_1)$, $s_2 = f(\omega_2)$.

Энтропия обладает свойством аддитивности

$$S = s_1 + s_2.$$

С другой стороны, поскольку вероятность осуществления данного состояния системы есть вероятность осуществления двух состояний её подсистем, то, по теореме умножения вероятностей,

$$W = \omega_1 \cdot \omega_2.$$

Таким образом

$$f(\omega_1 \cdot \omega_2) = f(\omega_1) + f(\omega_2).$$

Дифференцируем это уравнение по ω_1 .

$$\omega_2 f'(\omega_1 \omega_2) = f'(\omega_1).$$

Это же равенство дифференцируем по ω_2 :

$$f'(\omega_1 \omega_2) + \omega_1 \omega_2 f''(\omega_1 \omega_2) = 0,$$

или

$$f'(\omega) + \omega f''(\omega) = 0.$$

¹ М. Планк, Теоретическая физика, М, 1911, стр. 65.

Отсюда $\frac{f''(w)}{f'(w)} = -\frac{1}{w}$, и интеграция даёт

$$\ln f'(w) = -\ln w + c = \ln \frac{k}{w} \quad (c = \ln k).$$

Следовательно, $f'(w) = \frac{k}{w}$, откуда $f(w) = k \ln w + \text{const}$.

Итак,

$$S = k \ln w + \text{const}.$$

Как показал Планк, постоянная $k = \frac{R}{N}$, где R — универсальная газовая постоянная, N — число Авогадро. Эту постоянную называют «постоянной Больцмана», хотя, как указывает Планк, «Больцман никогда не вводил эту константу и, по моему убеждению, вообще не задавался вопросом о её численном значении». Планк ввёл эту величину и определил её значение в связи с законом чёрного излучения 14 декабря 1900 г. Тогда же им была введена и другая атомная константа «квант действия», или «постоянная Планка» h .

Идеи Больцмана вызвали оживленную дискуссию. Когда в 1872 г. в своей статье «Дальнейшее изучение теплового равновесия в молекулах газа» Больцман высказал мысль, составляющую содержание его H -теоремы, что атомистика вместе с гипотезой элементарного хаоса достаточна для последовательного истолкования необратимых процессов и в частности кинетического истолкования одностороннего возрастания энтропии, то Лосмидт в своей работе 1876—1877 г., а затем другие авторы, особенно ученик Планка, Э. Цермелло (1896), выдвинули возражение, состоящее в том, что из атомных гипотез с одинаковой вероятностью вытекает как возрастание, так и убыль энтропии.

Основываясь на теореме Пуанкаре (1890) о квази-периодических системах, Цермелло показал, что обычная кинетическая модель полностью и длительно изолированного газа ведёт себя как квази-периодическая система, т. е. по истечении достаточного промежутка времени подходит сколь угодно близко к любому начальному состоянию. Отсюда в противоположность H -теореме функция H не только убывает (что соответствует возрастанию энтропии), но и возрастает (что соответствует убыванию энтропии).

На это Больцман ответил, что этот обратный переход хотя и возможен, но мало вероятен. «Следовательно, — говорит Больцман, — то, что замкнутая система, состоящая из конечного числа молекул, первоначально находившаяся в упорядоченном состоянии и затем перешедшая к неупорядоченному, по прошествии невообразимо длительного при большом числе молекул времени должна снова принимать упорядоченные состояния, не только не опровергает нашу теорию, но даже является её подтверждением¹.

Экстраполируя этот образ на всю Вселенную, Больцман рисует её как необъятную совокупность отдельных звёздных систем огромных для нас, но чрезвычайно малых для всей Вселенной. Вся вселенная находится в состоянии теплового равновесия, все направления времени для неё безраз-

¹ Л. Больцман, Лекции по теории газов, стр. 522.

личны, и только в отдельных мирах вспыхивают флуктуации — отступления от равновесного состояния, и здесь переход к более вероятным состояниям, сопровождающийся возрастанием энтропии, обеспечивает односторонность течения времени (направленность процессов от «прошлого» маловероятного состояния к «будущему» более вероятному состоянию). «Этот метод кажется мне единственным методом, при котором можно представить себе второе начало, тепловую смерть каждого единичного мира, без одностороннего изменения всей Вселенной от определенного начала к заключительному состоянию»¹.

Своими результатами в области кинетической теории газов и статистического истолкования второго закона Больцман в сильной степени содействовал развитию и укреплению нового метода теоретической физики — статистического метода. Систематическое развитие этого метода привело американского физика В. Гиббса к созданию так называемой с т а т и с т и ч е с к о й м е х а н и к и. Основоположный труд Гиббса по этому вопросу вышел в 1902 г. Идею метода Гиббса Больцман характеризует следующим образом:

«Так как дифференциальные уравнения механики не содержат в себе ничего аналогичного второму закону, то представить себе механически его можно с помощью допущений относительно начальных условий. Чтобы найти такие подходящие допущения, мы должны принять во внимание то, что мы предполагали для объяснения кажущихся непрерывными тел, а именно, что из каждого сорта атомов или общих механических индивидуумов чрезвычайно большое число должно находиться в самых разнообразных начальных положениях. Для математической обработки этого предположения была создана особая наука, имеющая своей целью не исследование движений единичной механической системы, но нахождение свойств целого комплекса многочисленных механических систем, исходящих из самых разнообразных состояний».

Указав, что систематическая разработка этого метода рассмотрения поведения механических систем принадлежит Вилларду Гиббсу, заслуги которого Больцман оценивает очень высоко, Больцман кратко характеризует содержание статистической механики:

«Она распадается на две части. В первой части исследуются условия, при которых внешние свойства комплекса очень значительного числа механических индивидуумов не меняются, несмотря на оживлённое движение этих индивидуумов. Эту часть я называл бы статистической статикой. Вторая часть вычисляет постепенное изменение этих внешних свойств, если первые условия не соблюдены, — это я бы называл статистической динамикой».

Мы ограничимся только этой характеристикой Больцмана, так как подробное изложение идей и результатов статистической механики завело бы нас слишком далеко.

Для нашей цели важно лишь констатировать, что в результате развития физики в начале XX в. сложилась такая важная отрасль теоретической физики, как статистическая физика, вооружившая науку новым мощным методом познания. Возникновение этого раздела в сильной степени способствовало ускорению процесса сближения интересов физики и философии, который является характерной чертой нового этапа в развитии естествознания. В частности открытие физической наукой нового типа закономерностей — статистических — выдвинуло важный теоретико-познавательный вопрос о причинности.

¹ Л. Больцман, Лекции по теории газов, стр. 526.

Субъективисты считали причинность только сеткой, накладываемой нашим сознанием на поток ощущений и переживаний. Материалистически настроенные естествоиспытатели, наоборот, исходят из признания существования объективных закономерностей природы. «Закономерность в явлениях природы является основным условием их понимания», — говорил Больцман. И действительно, без признания таких объективных закономерностей никакая наука не была бы возможна, мир являлся бы хаосом, спелением случайностей.

Сами наши понятия, в том числе и понятие причинности, являются отражением действительных отношений, существующих во внешнем мире. Но если в мире господствует необходимость, то откуда берётся случайность?

Заслугой Больцмана является то, что он вскрыл неразрывную связь необходимости механического движения, отражаемой дифференциальными уравнениями механики, со случайностью начальных условий. Тем самым он близко подошёл к точке зрения диалектического материализма о неразрывной связи необходимости и случайности, о том, что случайность проявляет себя через необходимость и наоборот. Реальная диалектика мира стихийно познавалась естествоиспытателями и ломала застывшие формы мышления.

Говоря об антиномиях Канта по поводу непрерывности и прерывности материи, конечности и бесконечности пространства и времени, Больцман справедливо утверждает:

«Это не единственный случай, когда философская мысль наталкивается на противоречия; наоборот, мы эти противоречия встречаем на каждом шагу». Необходимо приспособить наше мышление к новым фактам естествознания, «приспособить наш образ мыслей, представления и понятия к данным опыта». Больцман призывает к замене старого привычного мышления новым мышлением, старой философии новой философией, которая «будет достойна названия царицы наук».

Больцман не знал, что такая философия была уже создана Марксом и Энгельсом, но он стихийно ощущал необходимость замены механистического материализма диалектическим. Таким образом, весь ход развития естествознания с неизбежностью вёл к диалектическому материализму. Сохранение старых теоретических позиций было невозможным: либо отдаться произволу субъективного идеализма и тем самым по существу похоронить науку, либо переходить на позиции диалектического материализма — так был поставлен вопрос развитием науки. В этом коренятся гносеологические корни кризиса физики, о котором писал Ленин. Здесь же мы только коротко остановимся на истории борьбы энергетики и атомистики.

Энергетика
и атомистика.

Возникновение и развитие энергетики является яркой иллюстрацией к известному положению Ленина о том, что она является пустоцветом, вырастающим на живом дереве могучего человеческого знания. Если при своём зарождении закон сохранения энергии встретил открытое противодействие эмпириков (вспомним, что Поггендорф отклонил статьи Мора, Майера, Гельмгольца), то по мере растущего признания этого закона, с одной стороны, многие физики эмпирики игнорировали механическую теорию теплоты, сохраняя в своих учебниках статью «Теплород»; с другой стороны, возникло обратное течение — сводить все явления природы к одной единственной сущности — энергии. Здесь опять-таки выявляется вся справедливость указания Ленина, что идеализм раздувает, односторонне превращает в абсолют одну из чёрточек из старой действительности. Энергетики воспользовались неясностью

понятия потенциальной энергии. Физики материалисты, начиная с Ломоносова, интерпретировали энергию взаимодействия покоящихся масс, как энергию скрытых движений. Физики идеалисты вообще объявили несостоятельной всякую попытку материалистического понимания энергии.

Со всей определенностью и ясностью выразил эту тенденцию энергетиков В. Оствальд. После краткого исторического обзора работ Майера, Джоуля и Гельмгольца он писал в девятой лекции своей «Натурфилософии»:

«Благодаря этим и некоторым другим попыткам в том же роде, идея энергии мало-помалу приобретала права гражданства в науке. Но в соответствии с общим законом психологии, это происходило таким образом, что новые идеи старались по возможности связать со старыми теоретическими и гипотетическими представлениями. (Здесь, как увидим из дальнейшего, Оствальд имеет в виду прежде всего представление о материи, — П. К.). Майер и его последователи в особенности твердо держались дуализма материи и энергии (разрядка Оствальда), которые они рассматривали как два понятия одинаковой важности. Относительно более частных гипотетических допущений, которые сводились к «толкованию» всех родов энергии, как механической, мнения разделились: «Джоуль и Гельмгольц принимали их, а Майер — нет».

Итак, основоположники закона сохранения и превращения энергии и не мыслили этот закон иначе, как материалистическим, энергия находилась в неразрывной связи с материей, имела материального носителя. Но послушаем историю дальше:

«Только после того как прошло пятьдесят лет со времени открытия закона энергии, был серьезно исследован вопрос, в каком отношении находятся между собой материя и энергия. В противовес мнению, принятому вначале, что они — равнозначные понятия, мало-помалу развивалось воззрение, что отношение между ними еще теснее, а именно, что они «неразделимы» (Оствальду понадобилась фальсификация взглядов Майера и Гельмгольца для обоснования своеобразной теории эволюции, приводящей к «высшей фазе» учения об энергии — «чистой» энергетике. — П. К.). Невозможно по крайней мере ни понять, ни определить материю, не пользуясь при этом свойствами энергии. Что касается обратного, т. е. попытки понять энергию без материи, то на нее долго не решались, несмотря на то что уже вскоре после обнародования закона энергии Ранкин, Максвелл и позже Гельм уже видели и заявляли, что в действительности всё, что мы узнаем о мире, заключается в знании существующих в нём отношений энергии. В общем материи все-таки отводили по крайней мере, роль носителя различных энергий, постепенно она, однако, достигла того почётного и покойного положения, которое занимает также «вещь в себе» Канта».

«Попытаемся, поэтому, построить мирозерцание исключительно из теоретического материала, совершенно не пользуясь понятием материи»¹.

Эволюция, описанная Оствальдом, и есть типичная картина возникновения и развития «пустоцвета».

Следует отметить, что энергетическая физика пережила определённую эволюцию. Вначале энергетическая физика была той частью теоретической физики, которая исходила из двух начал термодинамики. При этом она искала механическую интерпретацию этих принципов (напри-

¹ В. Оствальд, Натурфилософия, М., 1902, стр. 122.

мер, начало наименьшего действия). Самая энергия рассматривалась как нечто вполне материальное. В этом плане Н. А. Умов решал в 1873 г., исходя из вполне материалистических соображений, задачу о движении энергии, в ходе решения которой он ввёл важную количественную характеристику потока энергии (вектор Умова). Но затем энергетики (В. Оствальд, Гельм, Дюгем) стали рассматривать понятие энергии «в чистом виде», или, по выражению А. Г. Столетова, «оторванное от взрастившей его механической почвы». Рей характеризует эту эволюцию энергетики следующим образом:

«Впоследствии энергетическая физика стала физикой, которая объявила первоначальным и достаточным понятием понятие энергии, а оба упомянутых принципа (термодинамики. — П. К.) совершенно независимыми от рациональной механики... Энергетика скоро признала бесполезность всякого чувственного изображения. Таким образом, слово «энергетика» теперь чаще всего обозначает в научной или философской критике физическую теорию, которая удаляет всякое чувственное изображение при исследовании явлений».

Заметим, что в дальнейшей эволюции идеализма в физике и атом одно-сторонне превращается в «чистый символ». В. Гейзенберг в 1932 г. писал:

«В современной физике атомы теряют и это последнее свойство (протяжённость. — П. К.), они обладают геометрическими качествами не в большей степени, чем остальными — цветом, вкусом и т. д. Атом современной физики может быть лишь символически представлен дифференциальным уравнением в частных производных в абстрактном многомерном пространстве...

В современной физике для атома все качества являются производными, непосредственно он не обладает никакими материальными свойствами».

Во времена же Оствальда в символ превращали энергию. А. Рей, которого подробно изучал Ленин и неоднократно цитировал в своём труде, излагает в своей книге «Энергетическое и механическое миропонимание» точку зрения энергетиков следующим образом:

«Всякое видоизменение явления в действительности только превращение энергии; мы должны поэтому уметь выводить изменения естественных явлений из законов, управляющих превращением энергии. Энергия это только математическая переменная величина (подчёркнуто мной. — П. К.). Энергетик избегает строить какие-либо предположения по поводу внутренней сущности этой энергии»¹.

В другом месте Рей пишет:

«Основания энергетической физики, таким образом, были построены совершенно отвлечённо и математически»².

Несколько ниже Рей прямо характеризует тенденцию энергетики: «она стремится к чистому, абстрактному и идеологическому математизму»³.

Энергетики занимали непримиримую позицию по отношению ко всяким попыткам объяснить мир, т. е. раскрыть природу реальных взаимосвязей с помощью гипотез. В этом отношении энергетики продолжали линию, чётко намеченную ещё в начале XVIII в. Котсом в его известном предисловии к старому изданию «Начал» Ньютона. В особенности враждебно энергетики относились к атомистике. В. Оствальд утверждал, что

¹ А. Рей, Энергетическое и механическое миропонимание, СПб, 1910, стр. 34.

² Там же, стр. 42.

³ Там же, стр. 73.

в будущем атомы и молекулы будут погребены в пыли архивов. Что же касается самой энергетики, то с характерным для всех идеалистических систем самомнением она объявлялась истиной в последней инстанции. Говоря о всегдашнем стремлении теоретической физики к более мощным и совершенным обобщениям, Больцман замечает: «Но современные энергетики отнюдь не удовлетворяются этим стремлением, а утверждают, что они будто бы уже достигли этих более совершенных взглядов; поэтому с их точки зрения уже теперь должны быть изменены термины и методы теоретической физики».

В частности это изменение должно коснуться и механики. Такое механическое понятие, как масса, является, по Остwaldу, производным понятием, выводимым из кинетической энергии и скорости. Сами уравнения механики выводятся из принципа энергии. Действительно, для одномерной задачи они могут быть получены из уравнения энергии. Однако для трёхмерного движения уравнения энергии недостаточно. К нему надо прибавить новые принципы, например, принцип суперпозиции¹. Лауэ показал, что можно получить из уравнения энергии (интеграла энергии) уравнения механики, применив принцип относительности. Короче говоря, не все явления механики можно вывести из принципа энергии.

Если внутренние процессы в системе неизвестны, то, хотя принцип энергии и позволяет сделать некоторые важные общие заключения, детали движения он предсказать не в состоянии.

Таким образом в наиболее простой и наиболее полно изученной области физики — механике — энергетика оказалась несостоятельной. Она оказалась несостоятельной и в других областях.

Здесь прежде всего отметим интерпретацию второго закона термодинамики, в раскрытии природы которой атомистика, как мы видели выше, добилась таких замечательных успехов. Один из столпов энергетики Г. Гельмгольд правда объявил эти успехи ... схоластикой! Этой схоластике он противопоставляет свой «закон»: «для того, чтобы что-либо произошло в существующих энергиях, должны существовать различия в степени интенсивности»².

¹ Для одномерной задачи уравнение сохранения энергии имеет вид:

$$\frac{m\dot{x}^2}{2} + U = \text{const.}$$

Дифференцируя по t , получим:

$$m\ddot{x} + \frac{\partial U}{\partial x} \dot{x} = 0.$$

Так как $F_x = -\frac{\partial U}{\partial x}$, то отсюда получим:

$$m\ddot{x} = F_x,$$

т. е. уравнение Ньютона. Но в трёхмерном случае из уравнения

$$\frac{m(\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2)}{2} + U(x, y, z) = C$$

нельзя получить без дополнительных предположений трёх уравнений

$$m\ddot{x} = F_x, \quad m\ddot{y} = F_y, \quad m\ddot{z} = F_z.$$

² В. Остwald, *Натурфилософия*, стр. 189

Здесь мы встречаем понятие «степень интенсивности». Вот как определяют это понятие Оствальд: «Свойство, от равенства которого зависит покой соответствующих энергий, мы назовем интенсивностью. Температура, следовательно, есть интенсивность энергии теплоты»¹. Из этого определения и формулировки закона видно, что речь идет об очень «экономном», почти тавтологическом описании, напоминающем ответ Мольеровского Пюргона: «опиум усыпляет потому, что имеет способность усыплять». Вместо раскрытия природы второго закона, энергетики, основываясь на чисто внешних аналогиях, подогнали его под некоторый «универсальный» принцип выравнивания интенсивностей.

«В этом пункте, — писал Планк, — делают очень часто ошибку, которая в значительной мере препятствовала дальнейшему развитию науки. Желая придать второму закону теории тепла по возможности более общий характер, его, по Оствальду, стали называть вторым законом энергетики и старались придать ему такую формулировку, что он будто определяет направление всякого происходящего в природе процесса. Еще несколько недель тому назад я читал в публичной академической речи одного высокочтимого коллеги утверждение, что сущность второго закона проявляется в том, что камни падают вниз, вода не поднимается вверх, а течет вниз, что электричество течет от более высшего потенциала к более низкому потенциалу и т. п. Эта ошибка в настоящее время настолько распространена, что ее нельзя здесь обойти молчанием».

«Правда прежде всего в том, что эти утверждения ложны ... Камень может так же легко лететь вверх, как и падать вниз, вода может так же течь вверх, как например в фонтане, электричество может также переходить от низшего к высшему потенциалу, что, например, бывает при взаимном обмене электрическими зарядами обкладок конденсатора при колебательном разряде»².

Планк хорошо вскрыл пустоту и бессодержательность «второго закона энергетики». Сейчас никто не вспоминает о «факторах интенсивности», тогда как соотношение $S = k \ln p$ не сходит со страниц учебников физики и специальных работ.

Но энергетики выдавали сочинённые ими формулы за действительную науку, а атомистику за фантастику. Гельм писал:

«Не служат ли, таким образом, молекулярные размеры для того, чтобы мы могли вырваться из темницы чувств на простор мыслей, не заключается ли, может быть, подлинное значение атомизма в том, что он открывает нашему духу царство свободы? Но свободная игра духа превратилась бы в пустую задачу, если бы он забыл границу между вымыслом и истиной»

«... Но если начинают принимать сочиненное представление за сущность вещи, если начинают считать его более ценным, чем те опыты, на основании которых его сочинили, то перед ними открывается царство схоластики. И кто отказывается от вполне достаточного описания явлений, как его дает энергетика, кто отказывается от описания, не прибегающего к помощи вымысла, тот стоит на почве схоластики»³.

В ответ на эти выпады энергетиков Больцман резонно спрашивает: «Но разве все человеческие мысли что-то другое, а не образы действительности».

¹ В. Оствальд, Натурфилософия, стр. 188.

² М. Планк, Теоретическая физика, стр. 18—19.

³ Г. Гельм, Граница применения в физике механических моделей, сб. «Новые идеи в философии», № 2, Борьба за физические мировоззрения, стр. 174—175.

Если махисты и энергетики утверждают, что не следует двигаться дальше чувственных восприятий (на этом основании они отвергают атомистику), то Больцман делает отсюда логический вывод: «Значит, если быть последовательным, то нужно отрицать не только все другие существа, кроме собственного «я», но и все представления, которые имелись раньше»¹. Так борьба атомистического и энергетического направлений переходит в борьбу двух основных направлений теории познания.

Итоги борьбы энергетиков и атомистов очень хорошо подвёл в 1918 г. известный физик В. Вин.

«Энергетика вряд ли оказала какое-нибудь влияние на развитие физики. Она обещала больше, чем могла выполнить, и с самого начала страдала последствиями того, что недостаточно ясно отграничилась от выводов аналитической механики. Стремление приверженцев энергетики устранить атомистическую гипотезу также оказалось неудачным. Как раз в последние годы атомистика повела к величайшим успехам, тогда как энергетика оказалась бесплодной»².

Эта борьба показала далее, как важно теоретикам держать непрерывную связь с практикой, которая предохраняет от ложных выводов.

Курс физики
в начале XX в.

Изменения в методе и воззрениях физики нашли своё отражение в курсе опытной физики Н. А. Умова, вышедшем в 1901 г. Обзор этого курса даст нам общее представление о той эволюции, которую претерпела физика в рассматриваемую эпоху. При самом беглом сопоставлении курса Умова с курсом Петрушевского сразу бросается в глаза одно существенное отличие: курс Петрушевского носит справочный характер и не проникнут какой-либо одной связующей идеей. Такой же характер носили и вышедшие в 1897, 1898, 1899 гг. первые три тома курса Хвольсона, отличающиеся от учебника Петрушевского большим количеством сообщённых фактов и введением в учение о теплоте современного изложения термодинамики. Курс же Умова проникнут единой установкой, которая выражена в заключительном абзаце введения по курсу:

«Предмет физики есть изучение движений вещества. Задача физики — представление явлений помощью простейших механических моделей»³. Таким образом автор не только описывает физические явления, как это сделано в курсе Петрушевского, но и объясняет их на основе современного ему механического мировоззрения. Автор с самых первых строк учебника ясно и недвусмысленно говорит о том, что физика имеет дело с объективными явлениями внешнего мира, постигаемыми с помощью наших чувств:

«Ограниченное число чувств даёт нам возможность познавать такое множество тел и явлений природы, которое не поддаётся никакому подсчёту. Мы заключаем отсюда, что сигналы, получаемые нами из внешнего мира, несмотря на своё беспредельное разнообразие, приводятся к небольшому числу качественно различных групп. Отсюда следует, что тела природы обладают общими свойствами, а окружающие нас перемены или явления обуславливаются общими причинами. Отдел естествознания, посвящённый изучению общих свойств вещества и общих причин явлений, называется физикой»⁴.

Очень интересно и глубоко сформулирована автором цель физики: «Конечная цель исследования явления есть установление закона,

¹ Л. Больцман, Очерки методологии физики, стр. 87—88.

² В. Вин, Новейшее развитие физики, стр. 67.

³ Н. А. Умов, Курс физики, т. I, М., 1901, стр. 10.

⁴ Там же, стр. 5.

которому это явление подчиняется. Под физическим законом разумеется соотношение между физическими величинами, характеризующими явление... Закон выражает зависимость между переменными, константами и параметрами. Опыт показывает, что такие зависимости или законы природы неизменны. Если бы явления не управлялись неизменными законами, мы не могли бы изучать природу. Не должно переносить неизменяемость законов природы на естественное сочетание явлений. *Неизменяемость законов природы не враждебна преуспеянию человечества; напротив того, даёт ему могущественное орудие для борьбы с естественным течением явлений, когда оно несогласно с его целями. Преклоняясь перед неизменяемостью законов, человек пользуется ими при помощи техники для изменения естественного течения явлений* (курсив мой.—П. К.) Указания и первые уроки этой борьбы человек получает из того самого опыта, который лежит в основе естествознания».



Н. А. УМОВ

Под «неизменяемостью» Умов понимает объективный, абсолютный характер законов, которых нельзя изменить по произволу.

Так глубоко и по-современному понимает Умов цель науки и характер изучаемых ею законов. Важную роль в открытии законов природы Умов отводит гипотезе. Он пишет: «... на пределах применимости простейших из открытых нами законов мы встречаемся с новыми явлениями, для которых мы не можем подобрать простейшего явления, а должны для его объяснения делать предположение, касающееся не формальной стороны, а сущности явления. Такое предположение носит название гипотезы. К подобного рода гипотезам мы должны прибегать и в тех случаях, когда открываются связи между явлениями различного качества» (стр. 9).

Мы видим, что установка Умова существенно отличается от установок Петрушевского. В этом нельзя не видеть влияния развития физики, в частности теоретической физики, за последнее тридцатилетие. Физика глубже проникла в сущность явлений, что и привело к более глубокому пониманию её задач, и целей, и средств для достижения поставленных целей.

Раздел, посвящённый измерениям, не подвергся принципиальным изменениям. Следует отметить, что техника измерений, основанных на субъективных восприятиях наблюдателя, мало изменилась и в первой четверти XX в.; те же микрометры, весы, катетометры, термометры и т. п. составляли вооружение учебных лабораторий XX в. Только переход к электронной технике, к автоматической регистрации произвёл революцию в эксперименте, и можно не сомневаться, что к концу XX в. соответствующие страницы учебника Умова будут восприниматься как архаизм. Физику Умов разделяет на следующие пять частей: 1) общая физика, 2) учение о теплоте, 3) акустика, или учение о звуке, 4) оптика, или учение о свете, 5) учение об электричестве и магнетизме.

«Две последние части, — пишет Умов, — образуют отдел физики, трактующий о лучистой энергии». Что же касается первой части, то Умов определяет её предмет следующим образом:

«Предмет общей физики есть изучение свойств вещества и тех особенностей, которые оно представляет в своих различных состояниях — твёрдом, жидком и газообразном; эта часть физики распадается на два отдела: а) механику и б) молекулярную физику» (стр. 27).

КУРСЪ ФИЗИКИ.

ЛЕКЦИИ

Проф. Н. А. Умова.

ТОМЪ ПЕРВЫЙ.

Механика — Молекулярная физика — Теплота

Издательство «Книжный мир»
Москва, 1901 г.

М. К. Д. 4.
Книжный мир
1901.

Рис. 62. Титул учебника Н. А. Умова

Заметим, что за рассматриваемый период произошло разделение физики на две части: физику материи и физику эфира. Это отразилось в частности на классификации статей в реферативном журнале «Успехи физики». Он стал подразделяться на две части, носящие именно эти названия. В физику эфира вошли оптика, теория тепла, электричество и магнетизм. Умов, как видно, не придерживается такого подразделения, он объединяет оптику с учением об электричестве и магнетизме как отдел, изучающий «лучистую энергию». Может показаться странным, каким образом электростатика, магнетостатика и стационарные процессы могут быть отнесены к явлениям лучистой энергии. В связи с этим приведем содержание первого параграфа введения к оптике во втором томе курса:

§ 1. Лучистая энергия. Ещё сравнительно недавно тонкая невесомая материя, проникающая тела и заполняющая всё пространство, называемая эфиром, считалась местом исключительно одних световых явлений. В настоящее время

мы рассматриваем свет только как частный случай явлений, возможных в эфире. Все эти явления, происходящие в эфирной среде, связаны с распространением и движением энергии, которая становится современной наукой, на место покоя и инертности. Только такая подвижная энергия, а не мёртвая сила, тянущая к себе частицы материи, поддерживает существование и цельность мира. С движением энергии связывается представление о скорости её распространения, о форме того фронта, которым она распространяется, т. е. о форме той волны, которая несёт энергию; наконец, здесь же зарождается геометрическое представление о луче, т. е. о направлении, перпендикулярном к фронту волны. Таким образом, в настоящее время эфир считается местом весьма разнообразных явлений, сопровождаемых движением энергии, и всё учение об эфире

может быть сведено к учению о лучистой энергии. Только одну небольшую главу этого отдела составляет учение о свете»¹.

Таким образом, в основе умовского подразделения лежит его учение о движении энергии и успехи теории Максвелла. Следовательно, и на вто-

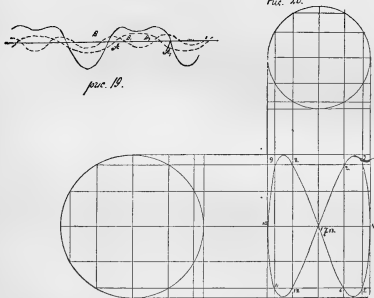
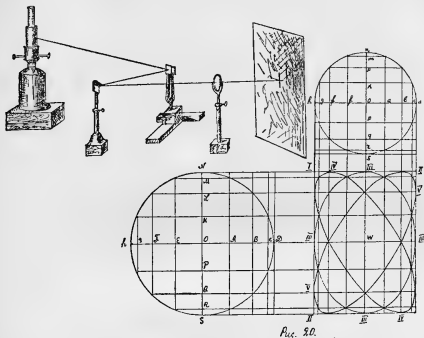


Рис. 63. Страничка рисунков из учебника Н. А. Умова

рой части курса отразились успехи в развитии физики, в особенности успехи теоретической физики. Современная наука также различает вещество и поле, рассматривая поле как разновидность материи.

Первая часть курса «Общая физика» не подверглась существенному изменению. Материал расположен более систематично, чем у Петрушевского, рассматривается более глубоко и последовательно, дополнен неко-

¹ Н. А. Умов, Курс физики, т. II, М., 1902, стр. 81.

торыми новыми данными, но в общем сохранил прежний характер. В изложении фактов молекулярной физики существенно изменилась теория растворов: рассмотрено осмотическое давление на полупроницаемую плёнку, открытое Пфеффером в 1877 г., законы разбавленных растворов, установленные Вант-Гоффом в 1887 г., и отступления от этих законов вследствие диссоциации молекул, найденные Авенариусом в 1887 г. Далее указано на отступления от закона Мариотта и дано уравнение Ван-дер-Ваальса (1873). В конце дана основа кинетической теории газов по Клаузиусу и Максвеллу, дана формула Максвелла распределения скоростей и значения наиболее вероятной и средней скорости по Максвеллу, а также средней квадратичной. Также приведена формула для длины свободного пробега и приведены численные значения молекулярных постоянных (число молекул в 1 куб. см, длина пробега, число соударений).



Рис. 64. Рисунок из учебника Н. А. Умова

В теплоте разделы термометрии и калориметрии существенно не изменились. В разделе об изменении агрегатных состояний находим параграф о растворении твёрдых тел, основанный на новейших данных, приведён закон Рауля о понижении точки замерзания растворов, установленный в 1886 г.

В разделе «пары» дана формула В. Томсона для упругости пара над искривлённой поверхностью (1870), рассмотрены исследования Рауля и теоретические обоснования Вант-Гоффа и Авенариуса для упругости паров растворов. Дается понятие о равновесии фаз и тройной точке (Гиббс, 1876). Далее имеется глава о критической температуре, в которой указаны три метода определения критических температур: «1) способ исчезновения мениска, 2) способ Авенариуса, основанный на изучении изотерм, 3) способ Надеждина, состоящий в следующем. Закрытая с обоих концов железная трубка

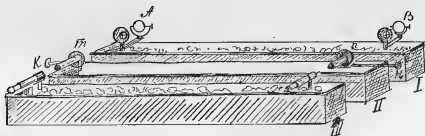


Рис. 65. Способ Руа и Рамсдена определения коэффициентов расширения твёрдых тел (рисунок из учебника Н. А. Умова)

подвешивается так, как подвешивается коромысло весов, и приводится в равновесие прибавочным грузом с одной стороны. Если в один конец её налить жидкость, то равновесие нарушится. Когда при разогревании мы достигнем критической температуры, то вещество, переходя в газообразное состояние, распространяется равномерно внутри трубки и равновесие восстанавливается» (стр. 354).

Следующая глава посвящена сжижению газов — этой главы в учебнике Петрушевского нет. Сообщается о достигнутом Кальете и Пикте в 1877 г. сжижении кислорода. Приведена критическая постоянная по

Ольшевскому, рассмотрен принцип машины Линде, и, наконец, сообщается о полученном в мае 1898 г. Дьюаром жидком водороде.

В главе «Механическая теория тепла» рассмотрена история вопроса о природе тепла, методы определения механического эквивалента теплоты. Далее даётся формулировка первого начала, применение его к обратимым процессам (причём рассматривается подробно условие обратимости: «Условие обратимости процесса заключается в бесконечно малом различии между температурой и давлением тела и внешней среды»). Дана формула первого начала $E \cdot \Delta Q = \Delta u + p \Delta v$ и представление о графическом изображении обратимых процессов. Разобраны изометрический ($v = \text{const}$), изобарический ($p = \text{const}$), изотермический и адиабатический, или изэнтропный, процесс для газов.

Изложение второго начала начинается с подробного рассмотрения цикла Карно, даётся понятие об определении абсолютной температуры по Томсону, вводится понятие энтропии, вопрос о тепловой смерти, выведено уравнение Клапейрона-Клаузиуса. Вопрос о «тепловой смерти» Умов решает следующим образом. «Допущение, что вселенная существует неопределённое время, заставляет

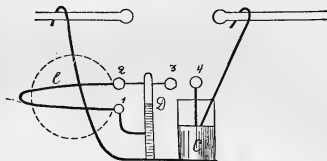


Рис. 66. Рисунок из учебника Н. А. Умова

нас усомниться в справедливости распространения этого закона на всю вселенную» (стр. 401). Далее приводится пример с «сортирующим демоном» Максвелла, из чего делается вывод: «Таким образом, обесцененная тепловая энергия может снова приобрести работоспособность, и закон энтропии не связан, так сказать, с природою вещей, а с их временным распоряжком» (стр. 403).

Отдельный параграф посвящён правилу фаз Гиббса. Раздел о теплоте заканчивается вопросом об источниках теплоты, о гипотезах восстановления солнечной энергии и понятием о законах термохимии: приведён закон Гесса и данные о теплотах сгорания различных веществ, полученные с калориметрической бомбой, изобретённой Бертло в 1881 г.

Таким образом учение о теплоте и молекулярная физика изменились за тридцатилетие существенным образом. Сформировались: термодинамика (Клаузиус, В. Томсон, Г. Гельмгольц, Дюгем, Гиббс, Н. Н. Шиллер, Н. А. Умов и другие), теория растворов (Вант-Гоф, Авенариус, Планк), теория фаз (Гиббс), учение о критическом состоянии и сжижении газов (Д. И. Менделеев, Ван-дер-Ваальс, М. П. Авенариус, Кальете, Пикте, Линде, А. И. Надеждин, А. Г. Столетов, Б. Б. Голицын, Д. Дьюар, Вроблевский, Ольшевский и др.). Все эти изменения нашли своё отражение в курсе Умова.

Вторая часть посвящена учению о звуке, оптике, электричеству и магнетизму.

Акустика не испытала существенных изменений. Вклад, внесённый в неё Гельмгольцем, попрежнему доминирует в изложении Умова, так же как и у Петрушевского и в превосходном курсе Столетова «Введение в акустику и оптику», вышедшем в 1885 г.

Глава первая оптики посвящена вопросу о скорости света. Описаны методы Ремера, Брайля, Физо и Фуко. Приведены данные Юнга и Форбса (1881), Корню (1878), Майкельсона (1879), Ньюкомба (1885).

Вторая глава посвящена фотометрии. Указано на новые единицы: ед. Виоля (1884), децимальная свеча $= \frac{1}{20}$ ед. Виоля (1889), лампа Гейфнера-Альтенека как фотометрический эталон.

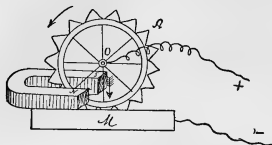


Рис. 67. Рисунок из учебника
Н. А. Умова

Третья глава: закон отражения и преломления ничего нового не содержит.

Четвёртая глава: теория отражения и преломления света содержит изложение теории Ньютона, Гюйгенса, Френеля. В параграфе «Зависимость показателя преломления от вещества» дана формула Лоренца-Лорентца (1880) и указано, что Г. А. Лоренц вывел её из электромагнитной теории света.

Глава пятая посвящена дисперсии, шестая спектральному анализу (чисто описательно), поглощению и испусканию света (даны законы и Кирхгофа, и Стефана, 1879). Здесь дан параграф об определении скорости небесных светил по принципу Допплера, параграф о влиянии температуры на плотность вещества, на линейный спектр, где между прочим указано на эффект Допплера как на причину расширения спектральных линий. Глава заканчивается пара-

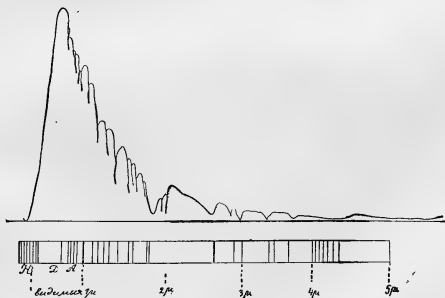


Рис. 68. Распределение энергии в спектре (рисунок
из учебника Н. А. Умова)

графом «Закономерность в распределении линий»: дана формула Бальмера (1885), причём указано, что со времени открытия этой формулы «исследование вступило на прочный путь».

Глава седьмая посвящена вопросу о превращении лучистой энергии. Здесь рассмотрены: флюоресценция, фосфоресценция, химическое и тепловое действие лучей, шкала волн. Здесь приведены данные о наиболее корот-

кой длины волны, полученной Шуманом, с вакуумным спектрографом в ультрафиолетовой части (1893). Этот параграф заканчивается указанием, что «за пределом инфракрасных лучей помещаются электрические волны Герца, за пределом ультрафиолетовых лучей — рентгеновские x -лучи и другие».

Параграф об аномальной дисперсии заканчивается наглядным представлением о теории Зельмейера (1871). В параграфе о цветах рассказы-

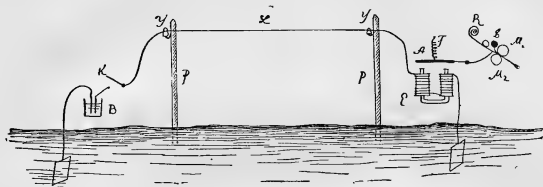


Рис. 69. Схема телеграфирования (рисунок из учебника Н. А. Умова)

вается об исследованиях Гельмгольца (1882) и Максвелла (1860). В параграфе о фотографии указывается, что Фогель ввёл в 1873 г. сенситизаторы, а Эдер в 1884—1886 гг. подверг их обстоятельному изучению.

Восьмая глава посвящена интерференции. Здесь описан интерферометр Майкельсона (1881), получение стоячих световых волн О. Винером (1889) и способ цветной фотографии Липмана (1891), говорится, что «В России по способу Липмана с большим искусством фотографировал ассистент физического кабинета Московского университета И. Ф. Усагин».

Глава девятая — дифракция — начинается параграфом: общий принцип дифракции, посвящена обобщению принципа Гюйгенса Кирхгофом (1883). Далее даётся понятие о дифракции Френеля и дифракции Фраунгофера.

Глава десятая посвящена поляризации света в классической трактовке Френеля.

Мы видим, что хотя в курсе оптики и приведены новые факты, однако её содержание существенно не изменилось: в основном это оптика Френеля.

Раздел электричества и магнетизма начинается с введения, посвящённого математической трактовке гравитационного поля, где вводятся основные понятия: напряжённость поля, поток, силовые трубки, потенциал, теорема Гаусса. Далее идёт глава, посвящённая магнетизму. В ней, кроме известных уже фактов, дана формула для расчёта магнитной цепи, предложенная братьями Гопкинсон и Каппом в 1886 г., и дано понятие о гистерезисе (Варбург, 1880).

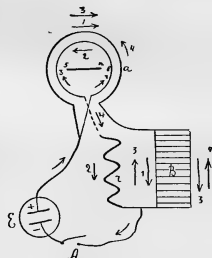


Рис. 70. Рисунок из учебника Н. А. Умова

В электростатике в параграфе, посвящённом гипотезам об электрическом состоянии, сказано:

«Максвелл, развивая идеи Фарадея, установил чрезвычайно плодотворный взгляд на причину электрических явлений, как на механическое состояние сред как наэлектризованных, так и их окружающих. Но воззрения Максвелла оказались недостаточными. В настоящее время причина электрического состояния усматривается в особом рода электрических атомах — электронах, положительных и отрицательных».

В этой же главе дана теория диэлектриков Клаузиуса (1879) и Моссоти (1847).

Электрокинематика содержит, кроме известных вещей, описание элемента Кларка (1872) и Вестона (1892), капиллярного электромера Липпмана (1873).

При изложении электролиза даётся теория Аррениуса (1887), понятие о скорости ионов, числе переноса, о термодинамической теории гальванического элемента Гельмгольца. В главе об индукции изложен колебательный разряд, вибратор Герца, опыты Тесла. В технических применениях электрического тока рассмотрены динамо-машины переменного тока, трансформаторы, служащие для передачи энергии на большие расстояния, динамо-машины постоянного тока, телеграф, телефон Белля, микрофон.

Далее идёт параграф: конечная скорость распространения электромагнитных сил. Экспериментальные основы электромагнитной теории света. Опыты Герца.

Заканчивается раздел электричества параграфом: катодные лучи и *x*-лучи Рентгена.

Последний раздел курса Умова посвящён геометрической оптике, на основе современных данных (иммерсионные системы, разрешающая сила).

Из этого обзора видно, что за тридцать лет с 1870 по 1900 г. физика пережила огромные изменения: изменилось не только ее содержание, но и методы. Физика

разделилась в соответствии с методами познания ее законов на экспериментальную и теоретическую, между которыми, как указывал Больцман, в 1904 г. образовалась громадная трещина. «Физика...,—говорил Гельмгольц в своем курсе лекций по теоретической физике,— есть наука, рассматривающая и изучающая общие свойства тел или, лучше сказать, всех тел. Она распадается на два большие отдела, излагаемые обычно отдельно один от другого. Их принято называть теоретической и экспериментальной физикой. Отделы эти очень существенно отличаются по применяемым при исследованиях приемам умственной работы¹. Говоря о разделении физики на экспериментальную и теоретическую, Больцман так определял соотношение между ними: «Экспериментальная должна собирать кирпичи, а уже строить из них здание — дело теоретической физики». Воздвигая здание, т. е. обобщая экспериментальные факты, теоретическая физика не может обойтись без гипотез. «Это относится,—указывает Больцман,—как к старым теориям, многие из которых в настоящее время являются спорными, так и к самым новейшим, жестоко ошибающимся, если они мнят себя свободными от всяких гипотез»². (Здесь Больцман имеет в виду энергетиков и махистов.) Но развитие гипотез, в частности атомистической, приводит к вопросам, лежащим на грани физики и философии. «Еще сравнительно

¹ Гельмгольц, Философия науки, ч. I. Физика, под ред. А. К. Тимирязева выпуск I, ГИЗ, 1923, стр. 68.

² Л. Больцман, Очерки методологии физики, стр. 117.

недавно естествоиспытатели избегали заниматься обсуждением подобных вопросов. Но этот вопрос¹ является для естествознания слишком важным, чтобы его можно было обойти молчанием. Его же нельзя обсуждать без того, чтобы не затронуть и ряд других, например о сущности закона причинности, материи, силы и т. д., о которых как раз и говорили, что они касаются естествоиспытателей и что их нужно предоставить целиком философии. В настоящее время положение вещей изменилось, и натуралисты с особой любовью занимаются обсуждением философских вопросов. И они совершенно правы².

Больцман указывает, что необходимо проанализировать орудия работы ученого: исторически сложившиеся понятия и мнения. Для разъяснения этих понятий как философия, так и естествознание в силу своей односторонности и ограниченности сделали очень мало.

«Благоприятных результатов можно ожидать здесь только при взаимной поддержке обеих наук».

К таким же выводам приходит и Гельмгольц. Указав во введении к своему курсу теоретической физики, что «в первой половине настоящего столетия между философией и естественными науками, под влиянием шеллинго-гегелевской философии, сложились мало отрадные отношения», Гельмгольц констатирует далее, что положение изменилось «и в последнее время естествоиспытатели много рассуждают о философских вопросах».

Философия, по мнению Гельмгольца, должна помочь естествоиспытателям в критике методов. «Критикой методов можно пренебрегать лишь до тех пор, пока возможно ограничиваться применением методов, уже на деле доказавших свою правильность. Но когда исследование доходит до той грани, где становится сомнительным, следует ли приписать встречающиеся трудности самому предмету или неудовлетворительности метода, тогда такая критика должна вступать в свои права»³.

Критический анализ основных понятий и методологических принципов, как показало дальнейшее развитие теоретической физики, оказался совершенно необходимым. Критика ньютоновской концепции пространства и времени была необходима при создании теории относительности, критика классических представлений о непрерывности энергии и движения, о локализации микрообъектов была необходима при создании квантовой механики. Следует, однако, отметить, что большой вред в этой работе нанесла активность идеалистической философии, затруднившей важную работу по критическому пересмотру основных понятий естествознания.

Таким образом, теоретическая физика отличалась от старой математической физики большей глубиной проникновения в сущность исследуемых явлений. На этом пути она добилась огромных успехов: «... с каждым десятилетием, — говорил Планк, — возрастает число и значение тех приемов, пользуясь которыми, человечество именно при посредстве теоретической физики научается использовать природу для своих целей. Современная техника была бы немыслима без теоретической физики»⁴.

Сказанные еще в 1909 году, эти слова Планка звучат сейчас удивительно злободневно. Показательно, однако, что Планк предостерегал против переоценки значения теоретической физики: «Думают, что при достаточном

¹ Больцман имеет в виду вопрос о прерывности или непрерывности материи.

² Л. Больцман, Очерки методологии физики, стр. 122.

³ Гельмгольц, Философия науки, стр. 67—68.

⁴ М. Планк, Теоретическая физика, стр. 8.

прогрессе наших знаний мы не только будем видеть внутреннее строение атомов, но и воплотим законы духовной жизни в физических формулах. Я думаю, что в целом мире нет ничего такого, что могло бы оправдать ту или другую надежду¹.

Создание электронных микроскопов, «умных» машин казалось бы опровергает этот вывод Планка. Но речь идет здесь о сведении к физике законов духовной и общественной жизни, а они, конечно, не сводятся к чисто физическим законам. Именно это и хочет сказать Планк.

В особенности недопустимо гипертрофирование теоретической физики в самой физике. «Мы не должны выводить явлений природы из наших понятий, а, наоборот, должны приспособить последние к явлениям природы»², — указывал Больцман. Природа не выводится дедуктивно из принципов теоретической физики, сами эти принципы должны быть выведены из природы. Поэтому физика является единой наукой, познающей законы природы с помощью эксперимента и теории, находящихся в неразрывной связи друг с другом:

«С самого начала необходимо подчеркнуть, что экспериментальная физика вне всякой связи с математической физикой представляет собой очень ограниченную науку, не достаточно глубоко проникающую в процессы физических явлений, и обратно, математическая физика без экспериментальной также окажется довольно односторонней и бесплодной: построение теорий о явлениях природы — вещь бесполезная, пока из собственного опыта собственными глазами не приобретено знакомство с этими явлениями»³.

«...Разделение физики на теоретическую и экспериментальную есть лишь следствие разделения имеющихся в настоящее время в нашем распоряжении методов и не будет продолжаться вечно»⁴.

Так понимали основатели теоретической физики её отношение к экспериментальной. Физика, оставаясь единой наукой, должна дать человеку правильное понимание об общих законах мира, помочь ему выработать целостную объективную «физическую картину мира». Характерной чертой физики рассматриваемого периода является стремление отразить единство мира сначала в механических, а затем электромагнитных образах.

¹ М. Планк, Теоретическая физика, стр. 8.

² Л. Больцман, Очерки методологии физики, стр. 125.

³ Гельмгольц, Философия науки, стр. 70.

⁴ Л. Больцман, Очерки методологии физики, стр. 125.

РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИКИ В ПОСЛЕДНЕЙ ТРЕТИ XIX в. ТЕОРИЯ МАКСВЕЛЛА

Возвращение
к идеям Фарадея.

Успехи электротехники, о которых мы говорили в первой главе, повлияли коренным образом на развитие науки об электричестве. Хотя теоретическая электрофизика и продолжала разрабатывать веберовскую идею элементарного взаимодействия движущихся электрических частиц, но мысль об определяющей или во всяком случае значительной роли среды в электрических взаимодействиях начала укрепляться в умах физиков, и с 70-х годов работы по изучению влияния среды на электрические и магнитные взаимодействия приобретают всё больший и больший удельный вес в физической тематике. Решающее влияние в этом направлении оказали труды великого английского физика Максвелла, явившиеся переломным пунктом в развитии науки об электричестве и охватившие двадцатилетний промежуток времени (1861—1881) ¹.

Этим фундаментальным исследованиям предшествовала напряжённая работа учёного по изучению научного наследия Фарадея, которому Максвелл лично сообщил свои соображения о связи электромагнитных и оптических явлений ².

Максвелл начал заниматься теорией электрических явлений ещё на студенческой скамье. К этому времени он уже проявил себя как первоклассный математик и экспериментатор. Будучи по складу мышления выдающимся геометром, Максвелл оценил и воспринял геометрическую модель Фарадея, оперировавшего образами силовых линий при решении сложных проблем теории электричества.

С другой стороны, ко времени начала максвелловских исследований по электричеству получила математическое оформление и развитие гидродинамическая модель трубок, и Максвелл усмотрел аналогию между этой моделью и моделью Фарадея. Он перенёс образы гидродинамики в учение об электромагнетизме.

В науке нередко встречается такая плодотворная «диффузия», когда результаты, полученные в одной научной области, успешно применяются в другой области. Мы отмечали в своём месте, что успехи волновой оптики стимулировали развитие теории упругости. Теперь результаты, полученные Гельмгольцем и В. Томсоном в гидродинамике, были использованы в науке об электричестве.

¹ Последний труд Максвелла, посвящённый электричеству, был опубликован после его смерти.

² Фарадей предвосхитил важнейший вывод теории Максвелла о волновом характере распространения электромагнитного поля.

Теория вихревого движения.

Для понимания дальнейшего напомним гидродинамическое понятие о «трубке тока». Если мы имеем установившееся движение жидкости, то любой бесконечно-малый элемент этой жидкости будет двигаться по некоторой линии, называемой линией тока. Трубочатая поверхность, ограничивающая какой-либо контур, взятый в этой жидкости, и образованная линиями тока, проведенными через точки этого контура, и будет трубкой тока.

Так как движение жидкости совершается по линиям тока, то слагающая скорости течения жидкости, перпендикулярная трубке тока в любой точке её поверхности, равна нулю — жидкость не течёт через поверхность трубки тока, и таким образом эта геометрическая поверхность может быть рассматриваема как непроницаемая для частиц жидкости физическая поверхность. Отсюда следует, что в идеальной несжимаемой жидкости объём жидкости, заключённый между двумя произвольными сечениями трубки тока, остаётся неизменным во всём движении этого объёма по трубке.

Таким образом, скорость течения жидкости возрастает в суженной части трубки и уменьшается в её расширенной части.

Основателями теоретической гидродинамики были петербургские академики Д. Бернулли и Л. Эйлер, о трудах которых было сказано в первом томе. Эйлер написал основные уравнения гидродинамики:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x};$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y};$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z},$$

где u , v , w — слагающие скорости течения жидкости в данной точке в данный момент времени, ρ — плотность жидкости, p — давление в данной точке жидкости.

Эйлер вывел далее так называемое уравнение непрерывности, являющееся выражением Ломоносовского закона сохранения материи для случая движения жидкости. Это уравнение имеет вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho w)}{\partial z} = 0.$$

Наконец, Эйлером был разработан случай движения жидкости, когда слагающие скорости жидкости являются частными производными некоторой функции координат Φ , называемой потенциалом скоростей. В этом случае для установившегося течения несжимаемой однородной жидкости, когда

$$\rho(x, y, z, t) = \rho_0 = \text{const},$$

предыдущее уравнение принимает вид:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0,$$

где Φ — потенциал скоростей. Это уравнение обычно называют уравнением Лапласа, хотя вернее будет его называть уравнением Эйлера-Лапласа. Оно играет важную роль в различных проблемах математической фи-

зики: гидродинамике, теории теплопроводности, теории потенциала, электростатике.

Максвелл приводит это уравнение в качестве образца плодотворной математической аналогии, позволяющей одними и теми же математическими средствами разрабатывать проблемы, относящиеся к совершенно различным областям физики. Эта математическая аналогия даёт возможность, например, единого подхода к колебательным явлениям самой разнообразной природы: механической, тепловой, акустической, электромагнитной, биологической и т. д.

В этом факте отражается единство материального мира. Единство природы обнаруживается в «поразительной аналогичности дифференциальных уравнений, относящихся к разным областям явлений», — отмечал В. И. Ленин, разбирая воззрения Л. Больцмана¹.

В 1858 г. появилась работа Гельмгольца «Об интегралах гидродинамических уравнений, которые соответствуют вихревым движениям». В 1869 г. В. Томсон опубликовал исследование «О вихревых движениях». Не излагая подробно и точно эти работы, относящиеся к истории аналитической механики, мы остановимся здесь на основных результатах этих исследований, причём постараемся дать представление о них в элементарных, наглядных образах, существенных для понимания метода и стиля Максвелла. Последний даже заимствовал из работы Томсона диаграммы для своего фундаментального «Трактата по электричеству и магнетизму».

Вихрем вектора $\bar{A}$ называется вектор, компоненты которого определены в декартовых координатах равенствами:

$$\text{rot}_x \bar{A} = \frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z}; \quad \text{rot}_y \bar{A} = \frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x}; \quad \text{rot}_z \bar{A} = \frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y}.$$

Название вихрь связано с тем обстоятельством, что выражения, определяющие компоненты вихря, встречаются при рассмотрении вращательного движения среды.

Вообразим себе некоторую среду, частицы которой находятся во вращательном движении, выделим в этой среде произвольный, бесконечно-малый объём и представим себе, что масса этого объёма отвердела, а остальные части среды удалены. Возьмём начало координат в какой-либо точке на оси вращения, угловую скорость вращения обозначим $\bar{\omega}$ и направим вектор, представляющий эту величину на оси, в сторону, которая связана с направлением вращающихся частиц элемента так же, как связаны поступательное движение и вращение правого винта. Линейную скорость какой-либо точки $P(x, y, z)$ элемента, радиус вектор которой $\bar{r}(x, y, z)$, мы можем выразить формулой

$$\bar{v} = [\bar{\omega} \bar{r}], \quad \text{т. е. } v_x = \omega_y z - \omega_z y, \quad v_y = \omega_z x - \omega_x z \\ v_z = \omega_x y - \omega_y x.$$

Если ось вращения принять за ось z , то

$$\omega_x = \omega_y = 0, \quad \omega_z = \omega.$$

Пользуясь определением вихря, легко показать, что

$$\text{rot } \bar{v} = 2\bar{\omega}.$$

¹ В. И. Ленин, Соч., т. 14, стр. 276.

Важную роль в исследовании характера движения жидкости играет циркуляция скорости. Эта величина определяется следующим образом.

Возьмём внутри жидкости произвольный контур, разобьём его на бесконечно-малые элементы $\overline{ds}$. Умножим скалярно значение скорости $\overline{z}$ в какой-либо точке элемента на этот элемент, т. е. образуем выражение

$$\overline{v} \overline{ds} = v ds \cos(\overline{v} \overline{ds}) = u dx + v dy + w dz.$$

Здесь u, v, w — компоненты вектора $\overline{z}$; dx, dy, dz — компоненты вектора $\overline{ds}$.

Составим сумму таких выражений для всего контура. Предельное значение этой суммы — криволинейный интеграл, распространённый по всему контуру s , и есть циркуляция скорости вдоль контура:

$$\oint_s \overline{v} \overline{ds} = \oint_s (u dx + v dy + w dz).$$

В. Томсон доказал, что для любого контура, взятого внутри идеальной жидкости и перемещающегося вместе с частицами этой жидкости, циркуляция скорости сохраняет неизменное значение. Ещё ранее Стоксом было найдено предложение, носящее название теоремы Стокса, которое в принятых нами обозначениях может быть записано в виде:

$$\oint_s \overline{v} \overline{ds} = \int_s \text{rot}_n \overline{v} dS,$$

где S — произвольная поверхность, опирающаяся на контур s , n — направление параллели к элементу dS этой поверхности. При этом направление нормали и направление обхода контура устанавливаются по правилу правого винта.

Если есть потенциал скоростей:

$$u = \frac{\partial \Phi}{\partial x}, \quad v = \frac{\partial \Phi}{\partial y}, \quad w = \frac{\partial \Phi}{\partial z},$$

то $\oint_s v ds = 0$, а следовательно, и $\text{rot } v = 0$.

Потенциальное течение жидкости есть движение безвихревое.

Чтобы движение было вихревым, необходимо существование таких контуров, для которых циркуляция не равна нулю. Очевидно, что в потенциальном движении жидкости не может быть замкнутых линий тока (иначе циркуляция вдоль такой линии была бы отлична от нуля), а следовательно, эти линии должны иметь начало и конец, т. е. в жидкости с потенциальным течением существуют места, где это течение возникает, и места, где оно прекращается. Эти места называются источниками и стоками.

Линия, направление которой совпадает с направлением вихря, называется вихревой линией, или вихревой нитью. Вихревой трубкой называется трубчатая поверхность малого сечения, ось которой совпадает с вихревой линией. В вихревой трубке частицы жидкости вращаются с одной и той же угловой скоростью вокруг оси вихревой трубки, которая в каждой точке направлена по вектору угловой скорости вращения. Таким образом, каждая часть вихревой трубки является вращающейся цилиндрической массой жидкости.

Допустим, что жидкость налита в сосуд, который приводится во вращение. Тогда частицы жидкости мало-помалу также придут во вращение с той же угловой скоростью вращения её, что и сосуд. При этом свободная поверхность жидкости из плоской превращается в искривлённую. Форму этой поверхности найдём, рассматривая условия динамического равновесия произвольного элемента жидкости. Пусть ось z совпадает с осью вращения и направлена вертикально. Рассмотрим элемент объёма жидкости, центр которого отстоит на расстояние x по горизонтали от оси вращения, и на расстояние z от свободной поверхности (рис. 71). Масса этого элемента

$$dm = \rho \, dx \, dy \, dz.$$

Чтобы этот элемент вращался с угловой скоростью ω по окружности радиуса x , на него должна действовать центростремительная сила:

$$df = dm \omega^2 x = \rho \omega^2 x \, dx \, dy \, dz.$$

Эта центростремительная сила будет создана, если будет избыточное давление с внешней стороны элемента. Такое избыточное давление возникает, когда внешняя часть превысит внутреннюю на некоторую величину dz . Тогда избыточное давление, направленное к оси, будет $\rho g dz$; действуя на площадку $dz dy$, оно создаст необходимую центростремительную силу df .

$$\rho g \, dz \, dz \, dy = \rho \omega^2 x \, dx \, dy \, dz.$$

Интегрируя, получим уравнение свободной поверхности жидкости — параболоид вращения:

$$z = \frac{\omega^2}{2g} x^2 + c.$$

Условия динамического равновесия вращающейся жидкости приводят к следствию, что вращающаяся цилиндрическая масса будет испытывать с боковой поверхности избыточное (по сравнению с покоящейся жидкостью) давление, направленное к оси вращения. Если этого давления нет, то равновесия нет — элементы удаляются по радиусам от оси вращения. Это избыточное давление $dp ds$ (ds — сечение, перпендикулярное x) создаёт необходимую центростремительную силу:

$$dp \, ds = \rho \omega^2 x \, dx \, ds.$$

$$\int_0^p dp = \int_0^r \rho \omega^2 x \, dx.$$

Отсюда

$$p = \frac{\rho \omega^2}{2} r^2 = \frac{\rho v^2}{2}.$$

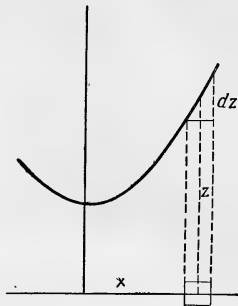


Рис. 71

Итак, вращение создаёт силы, растягивающие цилиндр по радиусам, для уравнивания которых и должно быть применено боковое давление

$$p = \frac{\rho\omega^2}{2} \cdot r^2.$$

С другой стороны, свободная поверхность цилиндра изгибается вращением; следовательно, вращение создаёт натяжения вдоль оси вращения, стягивающие (укорачивающие) цилиндр. В самом деле, вырежем внутри вращающейся цилиндрической массы цилиндрическое кольцо (рис. 72), ограниченное сверху и снизу поверхностью $ds = 2\pi x dx$.

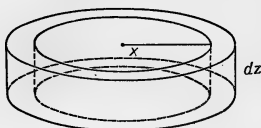


Рис. 72

Боковое давление $p = \frac{\rho\omega^2}{2} x^2$, передаваясь во все стороны, действует на эти поверхности с силой:

$$df = \frac{\rho\omega^2}{2} x^2 2\pi x dx,$$

растягивающей это кольцо. Таким образом, на основания вращающегося цилиндра действует растягивающая сила

$$f = \int_0^r \rho\omega^2 x^3 dx = \frac{\rho\omega^2}{4} r^4.$$

Для того чтобы цилиндр находился в равновесии, к его основаниям должно быть приложено внешнее давление P (рис. 74), так что

$$f = \frac{\pi\rho\omega^2}{4} r^4 = P \cdot \pi r^2.$$

Отсюда:

$$P = \frac{\rho\omega^2}{4} r^2 = \frac{p}{2}.$$

Следовательно, если вращающийся цилиндр подвержен всестороннему внешнему давлению $p = \frac{\rho\omega^2}{2} r^2$ и, кроме того, к его основаниям приложены растягивающие натяжения $\frac{p}{2} = \frac{\rho\omega^2}{4} r^2$, то масса жидкости будет находиться в равновесии.

Отсюда следует, что вихревая нить, концы которой упираются в поверхность твёрдых тел, «присасывается» к ним и твёрдые тела, соединённые вихревой нитью, испытывают взаимное притяжение. Свободная поверхность вращающейся жидкости втягивается внутрь, образуя параболическую воронку.

Пусть вихревая трубка имеет круглое сечение радиуса r . Циркуляция скорости по окружности этого сечения

$$v \cdot 2\pi r = 2\pi r^2 \omega = 2s\omega = s \cdot \text{rot } \vec{v} = I.$$

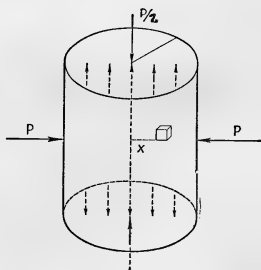


Рис. 73

Произведение площади поперечного сечения трубки на величину вихря называется **силой трубки**. Циркуляция скорости вращения частиц жидкости вокруг оси трубки равна таким образом силе этой трубки.

Если взять произвольный замкнутый контур, то циркуляция скорости по этому контуру равна алгебраической сумме сил вихревых трубок, охватываемых этим контуром. Сила вихревой трубки является величиной постоянной¹. В самом деле, допустим, что в идеальной несжимаемой жидкости существует вихревая нить длины l и с радиусом сечения r . Сила этой трубки $\pi r^2 \operatorname{rot} \vec{v} = 2\pi r^2 \omega$. Из-за идеальности жидкости к границам трубки нельзя приложить тангенциальных сил; следовательно, нельзя создать вращатель-



Рис. 74. Рисунок из работы Максвелла «О математической классификации физических величин»

ного силового момента вокруг оси трубки. Это значит, что момент количества движения вихревой трубки не меняется во времени. Если же вдоль оси трубка удлинена до нового значения длины l' , то её кинетическая энергия

$$K = \frac{1}{2} I \omega^2 = \frac{1}{4} \pi \rho l r^4 \omega^2$$

станет равной

$$K' = \frac{1}{4} \pi \rho l' r'^4 \omega'^2,$$

т. е. изменится на величину

$$\Delta K = K' - K = \frac{1}{4} \pi \rho (l' r'^4 \omega'^2 - l r^4 \omega^2)$$

в первом приближении $\omega = \omega'$, $r' = r$ и

$$\Delta K = \frac{1}{4} \pi \rho r^4 \omega^2 (l' - l).$$

Так как натяжение, приложенное к концам нити

$$F = P \pi r^4 = \frac{1}{4} \rho r^2 \omega^2 \pi r^2,$$

то $\Delta K = F(l' - l)$. Однако следует предположить, что трубка после удлинения перестает вращаться как одно целое твердое тело с угловой скоростью ω , а, наоборот, каждая частица m_i вращается со своей угловой скоростью

¹ Это вытекает из теоремы В. Томсона. Однако мы приведём приводимые ниже рассуждения, выясняющие физическую сущность этого важного предложения.

Ω_i . Тогда, если R_i — радиус вращения частицы m_i , кинетическая энергия запишется:

$$K = \frac{1}{2} \sum m_i R_i^2 \Omega_i^2. \quad (1)$$

Чтобы прирост энергии равнялся работе сил, растягивающих нить, должно быть:

$$K' - K = F(l' - l) = \frac{1}{4} \rho r^4 \omega^2 (l' - l) = \frac{1}{4} \pi \rho r^4 \omega^2 l' - \frac{1}{4} \pi \rho \omega^2 r^4 l,$$

т. е.

$$K' = \frac{1}{4} \pi \rho \omega^2 r^4 l'.$$

Положив $l' = kl$, находим $K' = kK$ — кинетическая энергия увеличивается в том же отношении, что и длина. Неизменность момента количества движения даёт условие:

$$\sum m_i R_i \Omega_i = \sum m_i r_i^2 \omega = \omega \sum m_i r_i^2. \quad (2)$$

Несжимаемость жидкости приводит к равенству

$$\pi r^2 l = \pi r_1^2 l'; \quad \frac{r^2}{r_1^2} = \frac{l'}{l} = k.$$

Отношение моментов инерции:

$$\frac{J}{J'} = \frac{M \frac{r^2}{2}}{M \frac{r_1^2}{2}} = k; \quad k \sum m_i R_i^2 = \sum m_i r_i^2. \quad (3)$$

Из этих условий могут быть получены равенства:

$$\Omega_1 - k\omega = 0; \quad \Omega_2 - k\omega = 0; \quad \dots \quad \Omega_i - k\omega = 0^1,$$

т. е. после растяжения трубка попрежнему вращается как целое с угловой скоростью, увеличенной в k раз. Её сила

$$2\pi r'^2 \Omega = 2\pi \frac{r^2}{k} k\omega = 2\pi r^2 \omega,$$

¹ Умножим равенство (2) на произвольный множитель λ_1 , равенство (3) на λ_2 и сложим с (1):

$$\sum m_i R_i^2 \Omega_i^2 + \lambda_1 \sum m_i R_i^2 \Omega_i + \lambda_2 R \sum m_i R_i^2 = k\omega^2 \sum m_i r_i^2 + \\ + \lambda_1 \omega \sum m_i r_i^2 + \lambda_2 \sum m_i r_i^2$$

или

$$\sum m_i R_i^2 (\Omega_i^2 + \lambda_1 \Omega_i + \lambda_2 k) = (k\omega^2 + \lambda_1 \omega + \lambda_2) \sum m_i r_i^2.$$

Если взять

$$\lambda_1 = -\omega k, \quad \lambda_2 = k\omega^2,$$

то правая часть равенства 0 и

$$\sum m_i R_i^2 (\Omega_i^2 - 2\omega k \Omega_i + k^2 \omega^2) = \sum m_i R_i^2 (\Omega_i - k\omega)^2 = 0,$$

откуда и вытекают наши условия.

т. е. осталась неизменной. В идеальной жидкости вихревая трубка не может быть ни создана, ни уничтожена, и её сила не может быть изменена. Возникновение и уничтожение вихревых трубок, равно как и изменение их силы, может быть осуществлено только в вязкой жидкости.

Можно установить следующие свойства вихревых трубок. Пусть течение жидкости в среде производится вихревой трубкой силы I , представляющей прямую линию бесконечной длины. Тогда линии тока в жидкости будут окружностями, центры которых лежат на оси трубки, а скорости течения

$$v = \frac{I}{2\pi r}$$

обратно пропорциональными расстоянию от оси трубки. Разбивая трубками тока жидкость, окружающую такую вихревую трубку, нетрудно подсчитать, что кинетическая энергия жидкости будет бесконечно велика. Прямая вихревая трубка бесконечной длины связана с бесконечно большим запасом энергии в идеальной жидкости.

Если прямая вихревая нить движется равномерно со скоростью u , перпендикулярной её оси, то картина движения в окружающей нить среде совпадает с той, которая получится, если нить остаётся в покое, а среда движется со скоростью u . Наложение этих двух движений даёт картину, аналогичную той, которая получается при движении прямого тока в однородном магнитном поле.

В среде имеется часть замкнутых линий тока, окружающих нить. Эта часть движется вместе с нитью. Граничная точка N части среды, увлекаемой вихревой нитью, определится условием

$$\frac{J}{2\pi R} = u; \quad R = \frac{J}{2\pi u}.$$

Давление жидкости со стороны N будет больше, чем на противоположной стороне; поэтому вихревая трубка будет испытывать силу, перпендикулярную скорости её поступательного движения, в результате чего она будет двигаться по окружности. В случае наличия двух параллельных вихрей картина течения жидкости, окружающей вихри, такова, что при одинаковом направлении вихрей они испытывают отталкивающую силу, при противоположности — притягательную.

Замкнутая вихревая трубка (вихревое кольцо) не может оставаться неподвижной, она движется поступательно. При этом скорость вращения частиц трубки совпадает со скоростью поступательного движения во внутренней части кольца и противоположна ей на внешней части. Скорость поступательного движения кольца тем больше, чем меньше его диаметр, и наоборот. Поэтому в вихревой теории атомов В. Томсона вихревые кольца, представляющие атомы при температуре абсолютного нуля, должны иметь бесконечно большой диаметр.

Прежде чем переходить к историческому анализу трудов Дж. К. Максвелла по электромагнетизму, дадим краткую биографическую справку об их авторе.

Джемс Клерк Максвелл родился 13 июня 1831 г. в Шотландии в своём наследственном имении Гленелер вблизи Эдинбурга. Выдающиеся математические способности Максвелла проявлялись ещё в годы учения в средней школе в Эдинбурге, и в особенности во время учения в Эдинбургском колледже, когда он самостоятельно работал над вопросами механики и геометрии.



Дж. К. Максвелл

С 1850 по 1854 г. Максвелл учится в Кембридже в знаменитом Тринити-колледж, в котором учился и работал Ньютон. По окончании колледжа Максвелл остаётся в нём на два года и работает над проблемами цветоведения и механики. Здесь же он начал свои исследования по электричеству.

С 1856 по 1860 г. Максвелл преподаёт физику в Абердине (Шотландия), решает трудную задачу об устойчивости от колец Сатурна, работает над проблемами теоретической и прикладной механики.

С 1860 по 1865 г. Максвелл работает в Кинг-колледже в Лондоне. Здесь он разрабатывает вопросы кинетической теории газов и занимается проблемами электродинамики. В этот период появляются его работы «О физических линиях силы» и «Динамическая теория поля».

С 1865 г. Максвелл оставляет службу и живет частным лицом в родном имении Гленлер. В это время он подготавливает свой трактат.

В 1871 г. Максвелл принимает предложение занять пост директора и профессора лаборатории Кэвендиша в Кембридже, организованной на средства этой знатной фамилии. Максвелл руководит строительством и организацией этой всемирно известной лаборатории, из которой впоследствии вышел ряд замечательных открытий в области электрических разрядов в газах и атомной физики. На посту директора и профессора лаборатории Кэвендиша Максвелл остаётся до самой смерти, последовавшей 5 ноября 1879 г.

Максвелл был всесторонним учёным как теоретиком, так и экспериментатором и практиком. Его перу принадлежит работа из области механики, астрономии, теории сооружений, машиностроения (регуляторы), оптики, кинетической теории газов, электрических измерений, теории электричества. Первое место в этой обширной и многогранной деятельности принадлежит работам в области электричества, увенчавшимся созданием теории, носящей его имя.

Первая работа
Максвелла
по теории
электромагнетизма.

В первой работе «О фарадеевских силовых линиях», написанной в Кембридже в 1855—1856 гг., Максвелл указывает на незаконченность теории электрических явлений, поскольку в ней ещё не уяснена «связь между покоящимся электричеством и электричеством текущим... между приложенным и индуктивными действиями в обоих состояниях»¹. Существующие теории снабжали огромным запасом сложных математических формул, относящихся к различным частным случаям, и Максвелл указывал, что уже трудность удержать их в памяти сама по себе является существенным препятствием к дальнейшему прогрессу.

Перед Максвеллом стояла дилемма: развить ли формальную математическую теорию, или создать новую физическую гипотезу?

¹ Дж. К. Максвелл, Избранные сочинения по теории электромагнитного поля, Гостехиздат, 1952, стр. 11 (дальнейшие ссылки на страницы относятся к этой книге).

«В первом случае мы совершенно теряем из виду обоснование явления и потому не можем прийти к более нужному представлению об их важнейшей связи, хотя и можем предвычислять следствия из данных законов».

Физическая гипотеза способствует некоторой предубеждённости оценке фактов — «слепоте по отношению к фактам и поспешности в допущениях». Поэтому Максвелл выбирает путь физической аналогии. «Под физической аналогией я разумею то частное сходство между законами двух каких-либо областей науки, благодаря которому одна является иллюстрацией для другой» (стр. 12). Такую аналогию он находит в явлениях движения несжимаемой жидкости и электрических взаимодействиях. «До сих пор исследование законов электрических и магнитных сил было принято начинать с допущения, что причиной этих явлений служат притягательные и отталкивающие силы между известными точками. Мы хотим рассмотреть этот же вопрос с другой точки зрения, более подходящей к нашим исследованиям, именно определяя величину и направление сил, о которых идёт речь, при помощи скорости и направления движения несжимаемой жидкости» (стр. 17).

Максвелл подчёркивает, что он пока не ставит своей целью создать «какую-нибудь физическую теорию в той области науки, в которой я не произвёл почти ни одного опыта», а что его задача «только показать, каким образом непосредственным применением идей и методов Фарадея лучше всего могут быть выяснены взаимные отношения различных классов открытых им явлений» (стр. 15).

Становится ясным, что Максвелла поразило богатство открытий Фарадея, не пользовавшегося формализмом математиков, а работавшего своим оригинальным методом, особенно рельефно выступающим перед фактом бесплодия формальных построений сторонников дальнего действия, единственным плодом усилий которых было обилие формул для расчёта уже открытых явлений.

Максвелл усматривает причину мощности метода Фарадея в том, что тот исследует роль среды в электрических и магнитных явлениях и обращается к картине движения среды уже изученной и изучаемой — жидкой среды. Так как эта картина призвана служить только иллюстрацией того, что происходит в пространстве, окружающем заряды и токи, то Максвелл несколько не заботится о том, чтобы жидкость, течение которой служит для такой иллюстрации, была похожа на действительную жидкость. «Субстанции, о которой здесь идёт речь, не должно приписывать ни одного свойства действительных жидкостей, кроме способности к движению и сопротивлению сжатию» (стр. 18). Эта жидкость лишена инерции, а следовательно, и массы. «Как ничто не мешает нам представлять её себе абсолютно несжимаемой, так ничто не мешает нам предположить, что она в известных местах создаётся из ничего, в других снова сводится к ничему» (стр. 21). Эти места называются источниками и стоками, обильность которых определяется числом производимых или уничтожаемых в единицу времени единиц объёма жидкости.

Если бы рассматривалась обычная идеальная жидкость, обладающая массой, то два источника или два стока притягивались бы, а стоки и источники отталкивались. Однако Максвелл наделяет жидкость только свойством испытывать сопротивление со стороны той среды, в которой она течёт. Это сопротивление он полагает пропорциональным скорости течения и направленным в сторону, ей противоположную. Коэффициент сопротивления зависит, кроме того, от природы среды. Таким образом, гипотетическая жидкость движется в некоторой среде, подобно тому,

как вода проникает сквозь губку. Чтобы скорость этой жидкости не менялась со временем, должно действовать давление, градиент которого уравнивает силу сопротивления. Отсюда условие стационарности потока в трубке тока

$$-\frac{dp}{dx} = kv.$$

Всё пространство, заполненное текущей жидкостью, можно разбить на слои поверхностями равного давления. Трубка тока направлена параллельно к этим поверхностям. Выбрав единицы объёма жидкости и единицы давления, можно разбить это пространство на единичные клетки, ограниченные соседними поверхностями равного давления, разность которого равна единице, и стенками трубки тока, в которой за единицу времени проходит единица жидкости. Таким образом работа, совершаемая силами давления против сил сопротивления, в такой клетке равна единице.

По данному распределению давлений в данной среде можно определить скорость течения, следовательно — построить систему единичных трубок и, таким образом, разыскать их начала и концы, т. е. источники.

Можно решить и обратную задачу, опираясь на принцип суперпозиции (наложения). Эту модель Максвелл применяет к решению задач электростатики, магнитостатики, стационарного тока.

Обильность источников в случае электростатики будет величиной заряда, в магнитостатике — магнитной массой; давление оказывается аналогом потенциала, скорость — сила электрического (и аналогично магнитного) поля. Коэффициент сопротивления k в электростатике будет величиной, обратной диэлектрической проницаемости, в магнитостатике — магнитной проницаемости, в электрическом токе — удельному сопротивлению.

Таким образом, с помощью своей модели Максвелл систематизирует факты стационарных электрических и магнитных процессов. Однако явление электромагнитной индукции не поддаётся истолкованию с помощью такой модели. Здесь проявляется новое инерционное свойство среды, которое Фарадей назвал *электротоническим состоянием*. «Пока это состояние остаётся неизменным, не происходит никакого индуктивного действия. Но как только это состояние изменяется, возникает электродвижущая сила, величина и направление которой зависит только от изменения рассматриваемого состояния» (стр. 57—58).

Первую часть своей работы Максвелл заканчивает следующей характеристикой её:

«В этом очерке я имею в виду представить фарадеевскую теорию электричества с математической точки зрения и ограничиваю свою задачу развитием тех методов, при помощи которых, по моему мнению, всего лучше можно охватить электрические явления и сделать их доступными подсчёту. Я старался ввиду этого представить математические идеи в наглядной форме, пользуясь системами линий или поверхностей, а не употребляя только символы, которые и не особенно пригодны для изложения взглядов Фарадея и не вполне соответствуют природе объясняемых явлений» (стр. 58—59).

И действительно, Максвеллу удалось получить результаты, которые в теории потенциала получаются сложным аналитическим путём. Далее он продолжает:

«До сих пор мне не удалось ещё разработать идеи об электротоническом состоянии настолько, чтобы можно было ясно представить его природу

и свойства, не прибегая к символам; поэтому в дальнейшем изложении я буду широко пользоваться алгебраическими символами и общеизвестными математическими действиями. Но я сохраняю надежду при внимательном изучении свойств упругих тел и движения вязких жидкостей найти такой метод, который позволил бы дать и для электротонического состояния некоторый механический образ, способный вести к общим заключениям» (стр. 59).

Во второй части своей работы Максвелл действительно более широко пользуется математической символикой, оставляет модель жидкости и оперирует с понятиями количество электричества, количество тока, магнитная масса и т. д.

Терминология Максвелла довольно своеобразная (о ней мы будем ещё говорить дальше). Он различает полную величину и величину в данной точке. Так, полное количество тока — это сила тока, текущего через данное сечение; количество тока в данной точке и в данном направлении — это слагающая вектора плотности тока по данному направлению. Полная электродвижущая сила вдоль отрезка кривой — это криволинейный интеграл, обычно вызываемый электродвижущей силой или электрическим напряжением. Электродвижущая сила в данной точке — это вектор напряжённости электрического поля.

Рассматривая связь между токами и магнитным полем, Максвелл устанавливает группу уравнений, которые в современном виде могут быть представлены векторным уравнением

$$\operatorname{rot} \bar{H} = \frac{4\pi}{c} \bar{j}$$

(Максвелл пользуется единицами, в которых коэффициент $\frac{4\pi}{c}$ отсутствует).

Электротоническое состояние, как это чувствует и сам Максвелл, связано с магнитным потоком, сцеплённым с данным контуром тока. Но эта связь Максвеллу кажется искусственной, и он стремится найти связь между электрическими и магнитными свойствами в данной точке. С этой целью он вводит для характеристики электротонического состояния векторную величину, которая в современной форме является не чем иным, как вектор-потенциалом. Составляющие вектор-потенциала Максвелл называет электротоническими функциями или составляющими электротонической напряжённости.

Используя вывод Гельмгольца для электродвижущей силы индукции, Максвелл приходит к уравнениям, являющимся зерном его будущих уравнений:

$$\alpha_2 = -\frac{1}{4\pi} \frac{d\alpha_0}{dt}; \quad \beta_2 = -\frac{1}{4\pi} \frac{d\beta_0}{dt}; \quad \gamma_2 = -\frac{1}{4\pi} \cdot \frac{d\gamma_0}{dt}.$$

В системе CGS и современной записи эти уравнения принимают вид

$$\bar{E} = -\frac{1}{c} \cdot \frac{\partial \bar{A}}{\partial t}.$$

Это соотношение Максвелл рассматривает как аналитическое выражение фарадеевской идеи электротонического состояния и выражает надежду, что он со временем представит «теорию электротонического состояния в такой форме, в которой относящиеся сюда соотношения выступили бы с полной ясностью без помощи аналитических выкладок» (стр. 82). Пока же он

заключает эту часть работы обзором теории электротонического состояния, которая является наброском его будущей теории.

Составляя циркуляцию вектор-потенциала по замкнутой кривой, мы получим величину, которую Максвелл называет полной электротонической интенсивностью вдоль замкнутой кривой.

Эта величина в силу соотношения

$$\bar{B} = \text{rot } \bar{A}$$

и теоремы Стокса оказывается магнитным потоком, сцеплённым с данным контуром.

$$\oint_e A_l dl = \int B_n ds = \Phi.$$

Эта связь сформулирована Максвеллом в виде первого закона электротонического состояния: *«Полная электротоническая интенсивность вдоль границы элемента поверхности служит мерой количества магнитной индукции, проходящей через этот элемент, или, другими словами, мерой числа магнитных силовых линий, пронизывающих данный элемент»* (стр. 84).

Вторым законом теории Максвелл считает связь между индукцией и напряжённостью поля, которую он называет уравнением магнитной проводимости:

$$\bar{B} = \mu \bar{H}.$$

Третий закон составляет содержание первого уравнения Максвелла, *«Полная магнитная интенсивность вдоль линии, ограничивающей какую-нибудь часть поверхности, служит мерой количества электрического тока, протекающего через эту часть поверхности»*.

$$\oint H_l dl = J \quad \left(\text{в системе CGSE: } \oint H_l dl = \frac{4\pi}{c} J \right).$$

Четвёртый закон — закон Ома:

$$\bar{j} = \lambda \bar{E}.$$

Пятый закон — эквивалентность тока и магнитного листка: *«Полный магнитный потенциал замкнутого тока измеряется произведением количества тока на полную электротоническую интенсивность вдоль цепи, считаемую в направлении тока»*:

$$U = \frac{J}{c} \Phi = \frac{J}{c} \oint A_l dl.$$

Шестой закон — ядро второго уравнения Максвелла: *«Электродвижущая сила (индукции), действующая на элемент проводника, измеряется производной по времени от электротонической интенсивности, независимо от того, обусловлена ли эта производная изменением величины или направления электротонического состояния»* (стр. 85).

$$\bar{E} = -\frac{1}{c} \cdot \frac{\partial \bar{B}}{\partial t}, \quad \text{или} \quad \oint \bar{E}_l dl = -\frac{1}{c} \cdot \frac{d\Phi}{dt}.$$

«Я сделал попытку, — говорит Максвелл, — дать в этих шести законах математическое выражение той идеи, которая, по моему мнению, лежит

в основе хода мыслей Фарадея в его «Экспериментальных исследованиях»... «Относительно истории предлагаемой теории я укажу, что употреблённые выше математические функции для выражения фарадеевского электротонического состояния и для определения электродинамических потенциалов и электродвижущих сил, насколько мне известно, совершенно ново» (стр. 87—88).

Эту теорию Максвелл и развивает последовательно в дальнейших работах, в противовес теории дального действия Вебера.

О физических силовых линиях

В 1861—1862 гг. появился ряд статей Максвелла, объясняющих в совокупности вторую работу Максвелла по теории электромагнетизма, носящую название «О физических силовых линиях».

В первой работе Максвелл остановился на пороге новой теории, теперь он её развивает. Фарадеевское электротоническое состояние — основной объект новой теории — является не чем иным, как магнитным полем. Роль среды сразу выдвигается на первый план, и Максвелл ставит своей задачей найти механическую модель, раскрывающую поведение этой среды в магнитных взаимодействиях. С помощью построенной им модели он и приходит к своим знаменитым уравнениям. О своём намерении построить такую модель он говорит с величайшей определённой ясностью: «Я намереваюсь теперь рассмотреть магнитные явления с механической точки зрения и исследовать, какие напряжения или движения среды способны вызвать наблюдаемые явления». Эта механическая модель должна раскрыть сложные взаимосвязи, имеющие место в индукционных процессах, и Максвелл полагает, что с этой точки зрения она имеет большую эвристическую ценность. «Если при помощи этой же гипотезы мы могли бы связать явления магнитного притяжения с электромагнитными явлениями и с явлениями индуцированных токов, то в этом случае мы нашли бы теорию, может быть даже и неправильную, однако ложность которой могла бы быть указана только при помощи экспериментов, значительно расширяющих наши познания в этой области физики» (стр. 109).

Передовой учёный работает по определённому плану, смело пользуется гипотезой, справедливо полагает, что даже неправильная гипотеза при своей экспериментальной проверке обогатит наше познание, приведёт к дальнейшему расширению области познанного.

В первой работе Максвелл дал механическую интерпретацию электрического стационарного поля и предполагает построить теорию электромагнитных процессов в среде, охватывающей эти процессы в полном объёме.

Путь Максвелла очень поучителен. Механик и геометр по складу мышления, великолепный конструктор механических приборов и моделей, он подошёл к неисследованной области таинственных электромагнитных процессов с позиций механики и геометрии.

Больцман справедливо указывает, что никто в настоящее время не отдаст предпочтения выводу максвелловских уравнений из этих механических представлений перед позднее усвоенным самим Максвеллом выводом

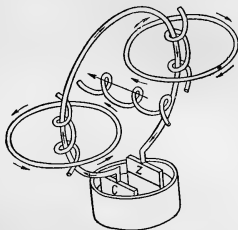


Рис. 75. Рисунок из «Трактата»

последних из более общих механических идей или перед методом Герца, который уравнения вовсе не выводит, а рассматривает их просто как феноменологическое описание фактов.

«Однако, — продолжает Больцман, — открытие произошло при посредстве механических представлений. Максвелл нашёл свои уравнения в результате стремления доказать при помощи механических моделей возможность объяснения электромагнитных явлений, исходя из концепции близкодействия, и только эти модели впервые указали путь к тем экспериментам, которые окончательно и решительно установили факт близкодействия и в настоящее время образуют наиболее простой и наиболее достоверный фундамент найденных другим путём уравнений» (стр. 195).

Путь Максвелла — великолепная иллюстрация ленинской мысли о развитии познания от живого созерцания к абстракции и от неё к практике. *От созерцания наглядной механической модели к абстракции уравнений и от них к практике радиотехники — таков путь развития максвелловской теории.* Вместе с тем метод моделирования и аналогий оказался очень плодотворным. В настоящее время этот метод с успехом используется при конструировании электронно-решающих машин.

Мы не будем подробно излагать весь ход рассуждений Максвелла, приведший его к достижению поставленной цели, а дадим понятие о его идеях в самых общих чертах. Основной факт, из которого исходит теория, — это наличие силовых взаимодействий и основная задача: определение величины и направления силы, действующей на данное тело в данном положении. Если считать носителем этих сил среду, то можно в пространстве, в котором действует сила, начертить **с и л о в ы е л и н и и**, направление и густота которых определяют направление и величину сил, создаваемых в пространстве действующими телами (магнитами, зарядами, токами). Иллюстрацией распределения этих линий является расположение железных опилок вблизи магнита.

Эта иллюстрация, указывает Максвелл, «естественно заставляет нас думать о силовых линиях как о чём-то реальном и показывающем нечто большее, чем только результирующую двух сил, непосредственная причина которых находится где-то на расстоянии и которые не существуют до тех пор, пока магнит не будет помещён в эту часть поля...; мы не можем отказаться от мысли, что в каждой точке, где мы находим эти силовые линии, должно существовать какое-то физическое состояние или действие, обладающее достаточной энергией, чтобы вызвать указанные явления» (стр. 108). Вот это физическое состояние и надлежит исследовать.

Механическое состояние среды можно рассматривать или как течение, или как волновой процесс, или как упругие напряжения и давления. Все эти образы обсуждает Максвелл, каждый из них имеет свои преимущества и недостатки для описания магнитных взаимодействий, и он останавливается на том, чтобы рассматривать «магнитное действие как род некоторого давления, или натяжения, или, вообще говоря, напряжения в среде» (стр. 111).

Но напряжение в упругой среде носит тензорный характер, сила давления или натяжения в данной точке, вообще говоря, «различна в различных направлениях». Если откладывать в данной точке по данному направлению отрезок, пропорциональный величине напряжения в данном направлении, то концы всевозможных отрезков, проведённых из данной точки, образуют поверхность трёхосного эллипсоида с центром в этой точке. Оси этого эллипсоида — главные оси упругости, взаимно перпендикулярные друг к другу. Если два главных напряжения равны, то эллипсоид стано-

вится эллипсоидом вращения; если все три главных напряжения равны, то эллипсоид превращается в шар, и мы имеем случай обычного гидростатического давления, не зависящего от ориентации площадки. Так как все направления вокруг оси магнитной силовой линии, в отличие от направлений вокруг поляризованного луча, равноправны, то натяжения, интерпретирующие магнитные действия, должны быть второго типа, т. е. представляться эллипсоидом вращения. В этом случае напряжение может быть разложено на простое гидростатическое давление, одинаковое по всем направлениям, и на действующее вдоль оси натяжение или давление. Если ось эллипсоида является осью наибольшего давления, то действующее вдоль неё напряжение является также давлением, в противном случае она натяжение.

Так как разноименные полюсы магнитов притягиваются, а одноименные отталкиваются, то силы, действующие вдоль оси силовых линий, суть н а т я ж е н и я. Таким образом, механическая интерпретация магнитных сил должна быть такова, что вдоль силовых линий должно действовать натяжение, а поперек гидростатическое давление. Иначе говоря, давление должно иметь большую величину в экваториальном, чем в аксиальном направлении. Но для вихревых трубок как раз имеет место разность давлений перпендикулярно оси и вдоль оси, равная

$$p_1 - p_2 = \frac{\rho}{4} \omega^2 r^2 = \frac{1}{4} \rho^2 v^2$$

в случае, если трубка представляет собой круглый цилиндр.

Если вихри не круговые, и если угловые скорости и плотности не всюду одинаковы, но изменяются по определённом закону, то $p_1 - p_2 = C \rho v^2$, где C — некоторый коэффициент, определяемый формой сечения вихря и законом распределения скорости по сечению, а v — линейная скорость на окружности вихря.

Максвелл пишет вместо $C \rho \frac{\mu}{4\pi}$, где μ — величина, пропорциональная плотности.

«Среда такого рода, наполненная молекулярными вихрями с параллельными осями, отличается от обычной жидкости тем, что она имеет различные давления в различных направлениях... она стремилась бы растянуться в экваториальном направлении... Для того чтобы среда, обладающая этими неодинаковыми в различных направлениях давлениями, могла быть в равновесии, должны быть выполнены условия...» (стр. 115—116). Ясно, что эти условия должны быть такими, чтобы в каждой точке среды возникающие напряжения уравнивались внешним противодействием. Но для этого надо знать распределение внутренних сил натяжения в среде. Максвелл и вычисляет эти силы. Он находит выражение для слагающей по оси x силы, действующей на единицу объёма:

$$X = \frac{1}{4\pi} \left\{ \frac{d(\mu\alpha)}{dx} + \mu\alpha \frac{d\alpha}{dx} - 4\pi \frac{dp_1}{dx} + \frac{d(\mu\beta)}{dy} \alpha + \mu\beta \frac{d\alpha}{dy} + \frac{d(\mu\gamma)}{dz} \alpha + \mu\gamma \frac{d\alpha}{dz} \right\}.$$

Так как

$$\alpha \frac{d\alpha}{dx} + \beta \frac{d\beta}{dx} + \gamma \frac{d\gamma}{dx} = \frac{1}{2} \cdot \frac{d}{dx} (\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2),$$

то

$$X = \alpha \frac{1}{4\pi} \left\{ \frac{d}{dx} (\mu\alpha) + \frac{d}{dy} (\mu\beta) + \frac{d}{dz} (\mu\gamma) \right\} + \frac{1}{8\pi} \mu \frac{d}{dx} (\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2) - \\ - \mu\beta \frac{1}{4\pi} \left(\frac{d\beta}{dx} - \frac{d\alpha}{dy} \right) + \mu\gamma \frac{1}{4\pi} \left(\frac{d\alpha}{dz} - \frac{d\gamma}{dx} \right) - \frac{dp_1}{dx}.$$

Здесь α , β , γ — составляющие вектора скорости по осям координат, p — гидростатическое давление.

Для представления этим выражением магнитных взаимодействий следует принять, что α , β , γ представляют собой компоненты напряжённости поля $\vec{H}$, μ — магнитная проницаемость. Тогда в современных обозначениях найденное Максвеллом выражение примет вид

$$\vec{f} = \frac{1}{4\pi} \vec{H} \operatorname{div} \vec{B} + \frac{1}{8\pi} \mu \operatorname{grad} H^2 - \frac{1}{4\pi} [\vec{B} \operatorname{rot} \vec{H}] - \operatorname{grad} p.$$

Если ввести фиктивные магнитные массы с помощью уравнения

$$\operatorname{div} \vec{B} = 4\pi \rho_m,$$

то первый член

$$f_m = \rho_m \vec{H}$$

представляет собой силу, с которой магнитное поле действует на единицу объёма намагниченного тела. Второй член

$$f_2 = \frac{1}{8\pi} \mu \operatorname{grad} H^2$$

указывает, что *«всякое тело, вносимое в поле, будет испытывать действие силы, направленной к местам большей магнитной интенсивности»*. Этой силой в частности объясняется притяжение железа магнитом.

Для интерпретации третьего члена Максвелл показывает, что работа, выполняемая при обведении единичным магнитным полюсом замкнутого контура, охватывающего ток, пропорциональна току и для бесконечно малых прямоугольных площадок может быть выражена в виде¹

$$\frac{1}{4\pi} \left(\frac{d\gamma}{dy} - \frac{d\beta}{dz} \right) = p, \quad \frac{1}{4\pi} \left(\frac{d\alpha}{dz} - \frac{d\gamma}{dx} \right) = q, \quad \frac{1}{4\pi} \left(\frac{d\beta}{dx} - \frac{d\alpha}{dy} \right) = r,$$

где p , q , r — составляющие плотности тока.

В современных обозначениях эти уравнения принимают вид

$$\operatorname{rot} \vec{H} = 4\pi \vec{j}$$

— первое уравнение Максвелла.

Но в таком случае третий член представляет собой объёмную плотность поперомоторных сил, действующих на электрический ток в магнитном поле:

$$\vec{f}_3 = [\vec{j} \vec{B}].$$

Итак, окончательно:

$$\vec{f} = \rho_m \vec{H} + \frac{1}{8\pi} \mu \operatorname{grad} H^2 + [\vec{j} \vec{B}] - \operatorname{grad} p.$$

Последний член просто указывает, что *«элемент объёма будет двигаться в направлении, в котором гидростатическое давление p уменьшается»*.

Вывод выражения для силы и составляет содержание первой части работы Максвелла.

В следующей части работы Максвелл рассматривает возможный механизм электромагнитной индукции. Явление электромагнитной индукции

¹ Максвелл обозначал частные производные знаком $\frac{d}{dx}$ и т. д.

заключается, как известно, в возникновении электрического тока в замкнутом проводнике при всяком изменении магнитного потока в пространстве, охватываемом проводником. В первой части работы была дана механическая интерпретация потока с помощью молекулярных вихрей. Так как магнитное поле неразрывно связано с электрическими токами, то надлежит исследовать физическую связь этих вихрей с токами.

Главная трудность в решении этой задачи для Максвелла заключалась в том, что совершенно неясно было, что такое электричество и что такое ток этого электричества: «...Мы до сего времени находимся в неведении относительно природы электричества: является ли электричество одной субстанцией, двумя субстанциями или, может быть, оно вовсе не является субстанцией, чем оно отличается от материи и как связано с ней?» (стр. 131).

Связь между магнитным полем и током такова, что знание поля даёт согласно первому уравнению возможность вычислить ток. Если свойства магнитных силовых линий удалось интерпретировать с помощью молекулярного вихревого механизма, то механическая интерпретация связи между магнитным полем и током, отражаемая первым уравнением, явилась бы, по мнению Максвелла, «значительным шагом к ответу на другой весьма важный вопрос, а именно: что такое электрический ток?»

Здесь мы должны сделать отступление от изложения работы Максвелла и коснуться вопроса о фарадеевско-максвелловском понимании природы тока.

Вопрос о природе электричества во времена Максвелла, как видно, был очень неясным. Ещё более неясной для Максвелла была картина движения чего-то неопределённого в проводнике. В 1873 г. в своём «Трактате» Максвелл говорит в связи с этим:

«До сих пор эксперимент не отвечает на вопрос о том, является ли электрический ток действительно током материальной субстанции или же двойным током, а также насколько велика или мала его скорость, измеренная в футах в секунду». Это же он повторяет в своей последней работе по электричеству, опубликованной после его смерти. Переносится ли электричество в проводнике в одном направлении или в противоположном, или в обоих сразу, это, говорит Максвелл, «представляет для нас вопрос неразрешимый. Точно так же мы не можем определить, насколько велика или мала скорость электричества в проволоке».

Электронная теория, которая впервые дала возможность подойти к решению этого вопроса, «неразрешимого» во времена Максвелла, ещё не существовала. Важным для истории вопроса, однако, является тот факт, что основное понятие этой теории — элементарный заряд — ведёт своё происхождение как раз от Фарадея и Максвелла. Об этом мы будем говорить в своём месте и увидим, что именно Максвелл был первым, со всей ясностью высказавшим идею «молекулярного заряда». Но он же считал невозможным или несвоевременным разрабатывать следствия этой идеи, поскольку вопрос о природе электричества оставался тёмным и недостаточно экспериментально обоснованным.

Единственно твёрдым опытным фактом был факт глубокой неразрывной связи между магнитным полем и током. Его-то Максвелл и делает опорным

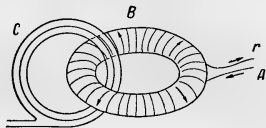


Рис. 76. Рисунок из «Трактата»

пунктом для продвижения в вопросе познания природы тока. Мысль Максвелла можно сформулировать так: *ток — это то, что создаёт магнитное поле.*

Фарадей выражался так: *ток — это ось сил.* Все другие эффекты тока, тепловые и химические, могут иметь место, а могут и не иметь, но магнитное поле всегда сопровождает ток. Эту фарадеевскую и максвелловскую точку зрения на ток неустанно пропагандировал и защищал акад. В. Ф. Миткевич. Именно этот отправной пункт дал возможность Максвеллу обобщить

понятие о токе введением смешения. Но об этом дальше.

Итак, необходимо построить механизм, отражающий связь, существующую в природе между током и магнитным полем. Максвелл подходит к конструированию этого механизма следующим образом.

Представим себе среду, заполненную вихрями. На границе двух одинаково направленных вихрей частицы среды должны участвовать одновременно в двух противоположных движениях. Взаимное существование двух таких движений трудно представить. Максвелл предполагает, что между соседними вихрями существует промежуточный слой

частиц, вращающихся в направлении, противоположном направлению вращения соседних вихрей. Частицы эти обладают ничтожной массой по сравнению с массой вихрей, и роль их аналогична роли промежуточного колеса в планетарной кинематической цепи зубчатых колёс.

Максвелл исследует «отношения, которые должны существовать между движениями наших вихрей и движениями слоя частиц, расположенных между ними наподобие холостых колёс» (стр. 132). Предполагая, что скорости частиц вихрей меняются непрерывно от центра к центру, и предполагая, что число этих промежуточных частиц, приходящихся на единицу поверхности, разделяющей оба вихря, равно $\rho = \frac{1}{2\pi}$, Максвелл находит для составляющей по оси x потока этих частиц (число частиц, проходящих через единицу площади в единицу времени) выражение

$$\rho = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{d\gamma}{dy} - \frac{d\beta}{dz} \right),$$

т. е. связь между потоком промежуточных частиц и скоростью вихревого движения выражается первым уравнением Максвелла, связывающим плотность тока с напряжённостью магнитного поля.

Таким образом, говорит Максвелл, «согласно нашей гипотезе электрический ток может быть представлен как поступательное движение частиц, расположенных между соседними вихрями. Мы можем считать, что эти частички очень малы по сравнению с размером вихря, что их массы в сумме дают ничтожно малую величину по сравнению с массой вихря и что очень большое количество вихрей с опережающими их частицами содержится

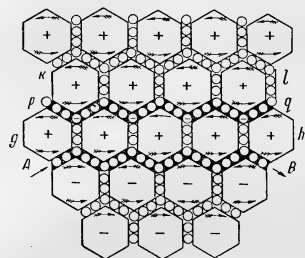


Рис. 77. Рисунок из «Избранных сочинений» Максвелла

в одной единственной цельной молекуле. Частицы необходимо предполагать вращающимися без трения между вихрями, которые они разделяют, не соприкасающимися друг с другом, так что в течение того времени, пока они остаются внутри одной и той же молекулы, нет потерь энергии в результате преодоления каких-либо сил сопротивления. Однако, когда имеется постоянное передвижение частиц в определённом направлении, они должны переходить от одной молекулы к другой и при этом испытывать сопротивление, в результате чего теряется электрическая энергия и рождается тепло.

Вот механизм электрического тока по Максвеллу. Поразительно, как, исходя из грубого механического образа кинематической цепи, Максвелл угадал многие черты будущей электронной теории: движение электронов в атоме без потерь энергии, передачу энергии ими при переходе от одного атома к другому.

Так как у Максвелла на первый план выдвигается магнитное поле, то электрон, как носитель этого поля, должен находиться во вращении (спин!). Образ вращения настолько сильно довлеет над всей максвелловской концепцией, что Максвелл прямо говорит о возможности, «что магнит вёл бы себя так, как если бы он содержал внутри себя вращающееся тело. Существование такого вращения могло бы быть обнаруженным опытами по свободному вращению магнита». Он добавляет: «Я сделал опыты с целью исследования того вопроса, но ещё не полностью проверил аппарат».

Так Максвелл предвосхищает будущие открытия магнитомеханических эффектов.

Исходя из своей модели, Максвелл вычисляет кинетическую энергию вихревого движения единицы объёма среды. Она оказывается равной

$$\frac{1}{8\pi} \mu (\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2).$$

Отсюда выражение энергии магнитного поля в современных обозначениях

$$\int \frac{\mu H^2}{8\pi} dv.$$

Энергия вихрей передаётся слоем промежуточных частиц, которые вследствие этого должны подвергаться действию каких-то сил.

Максвелл обозначает через P , Q , R компоненты силы, действующей «на единицу количества частиц», что следует понимать как силу, действующую на единицу электричества. Он считает, что эта сила есть с и л а в з а - и м о д е й с т в и я между вихрем и частицами.

Рассматривая энергетические соотношения этого взаимодействия, Максвелл устанавливает «отношения между изменениями скоростей движения вихрей и силами P , Q , R , с которыми они действуют на слой частиц между ними». Эти отношения выражаются уравнениями:

$$\frac{dQ}{dz} - \frac{\partial R}{\partial y} = \mu \frac{da}{dt};$$

$$\frac{dR}{dx} - \frac{dP}{dz} = \mu \frac{d\beta}{dt};$$

$$\frac{dP}{dy} - \frac{dQ}{dt} = \mu \frac{d\gamma}{dt}.$$

«Из этих уравнений, — говорит Максвелл, — мы можем определить отношения между изменениями скоростей вращения вихря $\frac{d\alpha}{dt}$ и т. д. и силами, действующими на слои частиц между вихрями, или, говоря на языке нашей гипотезы, отношения между изменениями состояния магнитного поля и электродвижущими силами, ими обусловленными».

Иначе говоря, эти уравнения представляют собой не что иное, как знаменитое второе уравнение Максвелла

$$\operatorname{rot} \bar{E} = - \frac{\partial \bar{B}}{\partial t}.$$

Максвелл решает эти уравнения, следуя методу Стокса, введя вспомогательные функции F , G , H , уравнениями:

$$\frac{dG}{dz} - \frac{dH}{dy} = \mu\alpha; \quad \frac{dH}{dx} - \frac{dF}{dz} = \mu\beta; \quad \frac{dF}{dy} - \frac{dG}{dx} = \mu\gamma$$

при условии

$$\frac{dF}{dx} + \frac{dG}{dy} + \frac{dH}{dz} = 0.$$

Он находит

$$P = \frac{dF}{dt}; \quad Q = \frac{dG}{dt}; \quad R = \frac{dH}{dt}.$$

Тем самым установлена математическая связь между вектор-потенциалом $\bar{A}(F, G, H)$, который характеризует электротоническое состояние, и электрическим полем, обусловленным этим состоянием.

Максвелл иллюстрирует найденную связь с помощью своего механизма. По поводу этого механизма Энгельс писал, что «вихри старого Декарта снова находят почётное место во всех новых областях знания». Действительно, рисунок, которым Максвелл иллюстрирует индукционные процессы, очень напоминает рисунки Декарта, в «Началах философии», но ещё больше он напоминает рисунки, которыми Ломоносов пояснял свои воззрения на структуру эфира.

Модели Максвелла возмущали своей грубой механичностью теоретиков типа Дюгама, мечтавших об упорядоченном математическом хозяйстве формальных теорий и попадавших в теоретических трактатах Максвелла, по их выражению, «на завод».

В механизмах Максвелла разбираться не легко, но основная идея его вполне ясна. Основной признак тока — магнитное поле. Самый электрический ток в проводнике — явление противоречивое. Это — непрерывное возникновение и разрушение электрического состояния (поля): электрическая энергия непрерывно превращается в тепловую. В постоянном токе устанавливается подвижное равновесие, которому отвечает установившееся магнитное поле. Если равновесие нарушается (допустим, ток, текущий в некотором направлении AB , прекращается), то это немедленно отразится на движении вихрей, и через них на состоянии соседнего слоя промежуточных частиц — они придут в движение в направлении AB . Это и есть индукция.

«Мы видим, — пишет Максвелл, — что индуктированные токи возникают благодаря тому, что электричество поддается действию электродви-

жущей силы, причём эта сила имеет место и в том случае, когда образованию заметного тока препятствует сопротивление цепи¹.

Электродвижущая сила с компонентами P , Q , R возникает при взаимодействии между вихрями и находящимися между ними частицами, когда скорость вращения вихрей изменяется в какой-либо части поля. Эта сила соответствует давлению на ось колеса в машине, когда скорость ведущего колеса увеличивается или уменьшается» (стр. 145).

Механические модели процесса индукции придумывались и Л. Больцманом для пояснения мыслей Максвелла. Известное механическое устройство для передачи движения на оси колёс автомобиля (дифференциал) является аналогом индуктивной связи двух контуров тока.

Максвелл находит далее выражение электродвижущей силы индукции в движущихся телах. Найденные им выражения

$$P = \mu\gamma \frac{dy}{dt} - \mu\beta \frac{dz}{dt} + \frac{dF}{dt} - \frac{d\Psi}{dx};$$

$$Q = \mu\alpha \frac{dz}{dt} - \mu\gamma \frac{dx}{dt} + \frac{dG}{dt} - \frac{d\Psi}{dy};$$

$$R = \mu\beta \frac{dx}{dt} - \mu\alpha \frac{dy}{dt} + \frac{dH}{dt} - \frac{d\Psi}{dz}$$

в современных обозначениях имеют вид

$$E = [\bar{V}\bar{B}] - \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} - \text{grad } \psi$$

и соответствуют гипотезе Герца о полном увлечении эфира движущимися телами.

В заключение второй части своей работы Максвелл резюмирует её содержание в восьми пунктах. Первый пункт — это гипотеза о том, что магнитно-электрические действия обусловлены средой, находящейся в известном состоянии движения, но ни в коем случае не действием на расстояние. Среда эта — или обычное вещество или эфир, связанный с веществом.

В следующих пунктах идёт речь о неравенстве давлений по отношению к направлению силовых линий, об интерпретации этого факта вихревым движением, осями которого являются силовые линии. Размеры этих вихрей малы по сравнению с размерами обычной молекулы.

В дальнейшем речь идёт об интерпретации электричества с помощью промежуточных частичек и их взаимодействии с вихрями. «При передаче движения от одного вихря к другому возникает сила между частицами и вихрями, которая сдавливает частицы в одном направлении, а вихри в противоположном. Силу, действующую на частицы, мы называем электродвижущей силой. Реакция на вихри равна и противоположна ей, так что электродвижущая сила не может переместить какую-либо часть среды как целое, она может только производить ток» (стр. 158). Максвелл указывает, что его анализ только аналогия, что у каждого явления есть свои специфические особенности и чем полнее аналогия, тем более длительные исследования потребуются «для вскрытия существенных различий».

Теперь Максвеллу предстоит объяснить механизм образования электродвижущей силы, которая вызывается вихревым движением гипотетической

¹ Это указание Максвелла очень важно; отсюда идёт то обобщение тока, которое получило название «ток смещения».

среды. Электродвижущая сила в точке по терминологии Максвелла, как мы уже говорили, есть не что иное, как напряжённость электрического поля. Электрическое поле связано с зарядами; следовательно, необходимо дать механическую картину состояния среды, окружающей заряжённое тело.

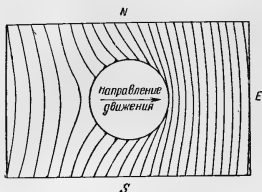


Рис. 78. Рисунок из «Избранных сочинений» Максвелла

Получается сложная и противоречивая модель, настолько запутанная, что известный французский математик Пуанкаре отказывался понимать, что такое заряжённый шар в максвелловской трактовке. Л. Больцман в примечаниях к излагаемой здесь работе вынужден был дать обширное разъяснительное примечание о свойствах максвелловской среды. Мы не будем здесь описывать эту модель Максвелла, а ограничимся лишь изложением важнейшей идеи Максвелла — идеи тока смещения.

Максвелл отправляется от известных опытов Фарадея, показывающих тождественность электрических процессов, вызванных различными факторами: «По опыту мы знаем, электрическое напряжение представляет собой явление, не зависящее от того, наблюдается ли оно в статическом или динамическом электричестве»... Максвелл распространяет это единство электричества дальше на процесс тока.

Электрическое напряжение вызывает ток в проводнике, сила которого обратно пропорциональна сопротивлению. Сопротивление присуще всем телам природы, «причём сопротивление металлов наименьшее, а сопротивление, например, стекла настолько велико, что заряд электричества сохраняется (согласно проф. В. Томсону) в стеклянном сосуде в течение ряда лет, не проникая сквозь толщу стекла» (стр. 162). В силу этого тела с бесконечно большим сопротивлением называются изоляторами, но они обладают также свойством передавать электрические действия без электрического тока. Проводник можно уподобить пористой мембране, через которую давление продавливают жидкость при большем или меньшем сопротивлении мембраны, изолятор аналогичен упругой непроницаемой мембране, которая обладает свойством передавать давление с одной части жидкости

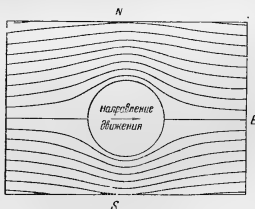


Рис. 79. Рисунок из «Избранных сочинений» Максвелла

Следовательно, $\eta = Ee$, т. е. E — «коэффициент, на который должно быть умножено выраженное в магнитных единицах количество электричества, чтобы получить число, выражающее то же самое количество электричества в электростатических единицах».

Из измерений Вебера и Кольрауша (1857) следует

$$E = 310\,740\,000\,000 \frac{\text{мм}}{\text{сек}}.$$

Далее Максвелл находит «скорость распространения поперечных колебаний через упругую среду, из которой состоят ячейки». Она оказывается равной

$$V = \frac{E}{\sqrt{\mu}}.$$

В воздухе или вакууме $\mu = 1$; следовательно,

$$V = E = 310\,740\,000\,000 \frac{\text{мм}}{\text{сек}}.$$

Отсюда фундаментальный вывод: «Скорость поперечных волновых колебаний в нашей гипотетической среде, вычисленная из электромагнитных опытов Кольрауша и Вебера, столь близко совпадает со скоростью света, вычисленной из оптических опытов Физо, что мы едва ли можем отказаться от вывода, что свет состоит из поперечных колебаний той же самой среды, которая является причиной электрических и магнитных явлений» (стр. 175).

Так возникла электромагнитная теория света — важнейшее достижение максвелловской теории. О возможной связи электрических и световых явлений думал ещё Ломоносов. Открытие Фарадеем магнитного вращения плоскости поляризации явилось первым экспериментальным доказательством наличия такой связи.

Для теории Максвелла это открытие имело то значение, что оно демонстрировало наличие некоторого вращательного действия в магнитном поле и таким образом подтверждало гипотезу молекулярных вихрей. Найденная им связь между электрическим током и магнитным полем (первое уравнение Максвелла) «имеет ту же математическую форму, что и соотношение между известными парами явлений, из каких одна имеет линейный, а другая вращательный характер». Такова, например, связь между линейной и угловой скоростью и связь между линиями тока в жидкости и вихревыми линиями, найденная Гельмгольцем в его гидродинамической работе 1858 г.

Гельмгольц, как указывает Максвелл, пришел к мысли, «что линии тока в жидкости распределяются относительно вихревых линий согласно тем же самым законам, что и законы, по которым магнитные силовые линии распределяются относительно электрических токов». Сам Максвелл устанавливает обратное соотношение, рассматривая магнетизм как явление вращения, а электрический ток связанным с действительным перемещением частиц. Это соотношение и подкрепляется открытием Фарадея.

В последней части своего сочинения Максвелл показывает, «что единственное действие, которое вращение вихрей оказывает на свет, состоит в том, что плоскость поляризации, начинает вращаться в том же направлении, что и вихри, на угол, пропорциональный: (A) толщине вещества, (B) составляющей магнитной силы, параллельной по лучу, (C) показателю преломления луча, (D) обратно пропорциональна квадрату длины волны в воздухе, (E) среднему радиусу вихрей и (F) ёмкости магнитной индукции» (стр. 184).

на другую. Таким образом в диэлектрике электрическое напряжение приводит к смещению электричества в определённом направлении.

«Это смещение не представляет собой настоящего тока, потому что, достигнув определённой величины, оно остаётся постоянным. Но это есть начало тока, и изменения смещения образуют токи в положительном или отрицательном направлении в зависимости от того, увеличивается смещение или уменьшается» (стр. 163). Смещение h пропорционально напряжённости R . Максвелл полагает.

$$R = -4\pi E^2 h,$$

где E^2 — коэффициент, зависящий от природы диэлектрика. Сила тока смещения выражается формулой:

$$i = \frac{dh}{dt}.$$

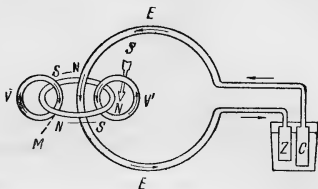


Рис. 80. Рисунок из «Трактата»

Действие магнитных вихрей на промежуточные частицы, как было выяснено, порождает электродвижущую силу, которая в проводнике создаёт ток, в результате чего энергия электрического поля превращается в тепло. В стационарном процессе будет наблюдаться непрерывный переход энергии движения вихрей в тепло и восполнение этой энергии от источника. В случае изолятора энергия движения вихрей порождает электрическую силу, которая, не превращаясь в движение частиц, непрерывно будет нарастать (или уменьшаться), т. е. образуется ток смещения.

Отсюда возникает необходимость обобщения уравнений, связывающих ток с магнитным полем. Максвелл пишет обобщённое уравнение в виде:

$$p = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{dy}{dy} - \frac{d\beta}{dz} - \frac{1}{E^2} \cdot \frac{dP}{dt} \right);$$

$$q = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{da}{dz} - \frac{dy}{dx} - \frac{1}{E^2} \frac{dQ}{dt} \right);$$

$$r = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{d\beta}{dx} - \frac{da}{dy} - \frac{1}{E^2} \frac{dR}{dt} \right).$$

Это первое уравнение Максвелла, в современной записи имеющее вид

$$\text{rot } \vec{H} = \frac{4\pi}{c} \vec{j} + \frac{\epsilon}{c} \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}.$$

Вычислив напряжение, возникающее в результате динамических процессов, Максвелл находит выражение для кулоновского взаимодействия двух малых заряженных тел:

$$F = -E^2 \frac{e_1 e_2}{r^2},$$

где e_1 и e_2 — заряды тел в динамической мере. Если те же заряды измерить в статической мере, то

$$F = -\frac{\eta_1 \eta_2}{r^2}.$$

Теория Максвелла ныне представляет только исторический интерес. Сам Максвелл сознавал её неполноту и указывал на то, что физическое объяснение этого явления «представляет собой значительные трудности, о которых нельзя сказать, чтобы они до сего времени (это было написано в 1873 г. в «Трактате». — П. К.) были побеждены».

Хотя Максвеллу и удалось описать кинематику явления, но по его теории эффект вращения должен наблюдаться и в эфире, чего нет на самом деле.

Предсказание Фарадея.

Открытие электромагнитной природы света является великолепной иллюстрацией диалектики развития содержания и формы. Новое содержание — электромагнитные волны — было выражено в старой форме картезианских вихрей.

Несоответствие нового содержания, появившегося в результате развития электромагнетизма, не только старой форме теории дальнего действия, но и механической теории эфира ощущал уже Фарадей, искавший для выражения этого содержания новую форму. Такую форму он усматривал в силовых линиях, которые следовало рассматривать не статически, а динамически. Развитию этой мысли посвящены его работы «Мысли о лучевых вибрациях» (1846) и «О физических линиях магнитной силы» (1851).

Открытие Фарадеем в 1845 г. связи между магнетизмом и светом явилось новым содержанием в учении о свете и вместе с тем ещё раз указывало на строгую поперечность световых колебаний. Всё это плохо укладывалось в старую форму механического эфира. Поэтому Фарадей и выдвигает идею силовых линий, в которых происходят поперечные колебания. «Нельзя ли, — пишет он, — предположить, что колебания, которые в известной теории (волновой теории света. — П. К.) принимаются за основу излучения и связанных с ним явлений, происходят в линиях сил, соединяющих частицы, а следовательно, массы материи в одно целое. Эта идея, если её допустить, освободит нас от эфира (разрядка моя. — П. К.), являющегося с другой точки зрения той средой, в которой происходят эти колебания»¹.

Фарадей прямо указывает, что колебания, происходящие в линиях сил, представляют собой не механический процесс, а новую форму движения, «некий высший тип колебания», как он выражается. Эти колебания поперечны и потому могут «объяснить чудесные разнообразные явления поляризации» и не похожи на продольные звуковые волны в жидкостях и газах. Его теория, как он говорит, «пытается устранить эфир, но не колебания». Эти магнитные колебания распространяются с конечной скоростью:

«... Появление изменения в одном конце силы заставляет предполагать последующее изменение на другом. *Распространение света, а потому, вероятно, всех лучистых действий, требует времени, и чтобы колебание линий силы могло объяснить явления излучения, необходимо, чтобы такое колебание также занимало время*»² (курсив мой. — П. К.).

Итак, поиски новой формы привели Фарадея к установлению важной идеи поперечных магнитных колебаний, распространяющихся, как и свет, с конечной скоростью. Но это и есть центральная идея электромагнитной теории света.

Эта мысль у Фарадея возникла ещё в 1832 г., через несколько месяцев после открытия электромагнитной индукции. Приведём публикацию «Открытие Фарадея», напечатанную в сборнике «Электрические колебания и волны»:

¹ «Из предистории радио», Сборник сост. проф. С. М. Рытова, АН СССР, 1948, стр. 53.

² Там же, стр. 56.

«Печатаемый ниже текст письма был найден в конце 1938 г. в архивах Королевского общества и опубликован в *Wilhelles Engineer*, 1938, № 176. Письмо это было написано М. Фарадеем и датировано 12 марта 1832 г. На конверте письма было написано: «Новые воззрения, подлежащие в настоящее время хранению в запечатанном конверте в архивах Королевского общества».

«Некоторые результаты исследований, описанных в двух статьях под заглавием «Экспериментальные работы с электричеством», недавно прочтённых в Королевском обществе, и вопросы, вытекающие из них в связи с другими взглядами и опытами, привели меня к заключению, что на распространение магнитного воздействия требуется время, т. е. при воздействии одного магнита на другой отдалённый магнит или кусок железа влияющая причина (которую я позволю себе назвать магнетизмом) распространяется от магнитных тел постепенно и для своего распространения требует определённого времени, которое, очевидно, окажется весьма незначительным.

Я полагаю также, что электрическая индукция распространяется точно таким же образом. Я полагаю, что распространение магнитных сил от магнитного полюса похоже на колебания взволнованной водной поверхности или же на звуковые колебания частиц воздуха, т. е. я намерен приложить теорию колебаний к магнитным явлениям, как это сделано по отношению к звуку и является наиболее вероятным объяснением световых явлений.

По аналогии я считаю возможным применить теорию колебаний к распространению электрической индукции. Эти воззрения я хочу проверить экспериментально, но так как моё время занято исполнением служебных обязанностей, что может вызвать продление опытов, которые в свою очередь могут явиться предметом наблюдения, я хочу, передавая это письмо на хранение Королевскому обществу, закрепить открытие за собой определённой датой и, таким образом, иметь право, в случае экспериментального подтверждения, объявить эту дату датой моего открытия. В настоящее время, насколько мне известно, никто из учёных, кроме меня, не имеет подобных взглядов¹.

Королевский институт
12 марта 1832 г.

М. Фарадей

Гениальный учёный понимал всю важность своего открытия, из которого в дальнейшем развилась радиотехника.

Поэтому Максвелл пишет в записке, найденной В. Бреггом в библиотеке Королевского общества:

«Электромагнитная теория света, предложенная им (Фарадеем) в «Мыслях о лучевых вибрациях» (*Phil. Mag.*, май 1846) или «Экспериментальных исследованиях» (*Exp. Res.*, стр. 447) — это по существу то же, что я начал развивать в этой статье («Динамическая теория поля», *Phil. Mag.*, 1865), за исключением того, что в 1846 г. не было данных для вычисления скорости распространения. Дж. К. М.»².

К изложению этой фундаментальной работы Максвелла и обращаемся. Хотя основные положения теории Максвелла были сформулированы в предыдущей работе и там же написаны уравнения этой теории, тем не менее в истории физики основоположной работой считается именно «Динамическая теория поля». С момента появления этой работы (в «Трудах Королевского общества»,

¹ Цитировано по сборнику «Электрические колебания и волны», вып. 1, под ред. проф. В. К. Лебединского и акад. М. В. Шулейкина, Связьиздат, 1941, стр. 33.

² В. Б р э г г, История электромагнетизма, Гостехиздат, 1947, стр. 32.

1864, и «Философском магазине», 1865) идеи Максвелла становятся достоянием широких кругов физиков.

Модели первых работ были непонятны учёным континента и, повидимому, даже Герц, столь много сделавший для укрепления и развития теории Максвелла, не заметил уравниваний для движущихся сред в работе «О физических силовых линиях», которые были написаны именно в той форме, которая называется формой Герца.

В «Динамической теории поля» Максвелл стремится «убрать леса» теории и придать ей более законченный и систематический вид. В первой части работы, излагая её программу, Максвелл говорит о механических образах, но уже не в столь конкретной форме, как это имело место в предыдущих работах. Он характеризует свою теорию в следующих выражениях:

«Теория, которую я предлагаю, может быть названа теорией электромагнитного поля, потому что она имеет дело с пространством, окружающим электрические или магнитные тела, и она может быть названа также динамической теорией, поскольку она допускает, что в этом пространстве имеется материя, находящаяся в движении, посредством которой и производятся наблюдаемые электромагнитные явления».

«Электромагнитное поле — это та часть пространства, которая содержит в себе и окружает тела, находящиеся в электрическом или магнитном состоянии»¹.

Таким образом, Максвелл вводит в науку новое фундаментальное понятие электромагнитного поля, определение которого он здесь даёт.

Как видим, поле это часть пространства, заполненная движущейся материей, производящей электромагнитные действия. Эта материя всегда налицо, так как если откатать обычную (Максвелл её называет «грубой» или «сгущённой» материей), то всегда остаётся материя, передающая свет и тепло — эфирная материя. Это материя «обладает способностью получать и сохранять два вида энергии, а именно «актуальную» энергию, зависящую от движения её частей, и «потенциальную» энергию, представляющую собой работу, которую среда выполнит в силу своей упругости, возвращаясь к первоначальному состоянию, после того смещения, которое она испытала»². В силу этих движений и упругости среда передаёт волновые действия с огромной скоростью, и эти действия являются светом.

Факты магнитного вращения плоскости поляризации и электромагнитной индукции «приводят к тем же заключениям, как и оптические явления», т. е. к заключениям о наличии среды, части которой могут быть приведены в движение, и что связи между частями среды, в силу которых передается движение от одной части к другой, носят упругий характер, и потому энергия среды «может существовать в двух различных формах, одна из которых является актуальной энергией движения частей среды, а другая — потенциальной энергией, обусловленной связями частей в силу их упругости»³.

Отсюда концепция некоего механизма. «Такой механизм должен подчиняться общим законам динамики, и мы должны иметь возможность вывести все следствия этого движения, предполагая, что известна форма отношения между движениями частей»⁴.

¹ Дж. К. Максвелл, Избр. соч., стр. 253.

² Там же, стр. 254.

³ Там же, стр. 260.

⁴ Там же.

В этом механизме, представляющем динамические свойства поля, Максвелл прежде всего ищет аналог тем свойствам электромагнитных явлений, которые выявляются в процессах электромагнитной индукции и которые Фарадей характеризовал понятием «электротоническое состояние».

В индукционных действиях отчётливо проявляется своеобразная аналогия инерционных сил механики. Но электромагнитная инерция отличается от инерции тела тем, что она зависит от формы проводника и от окружающей среды. Максвелл вводит в качестве основной динамической характеристики поля электромагнитный момент или электромагнитное количество движения. Механическим аналогом этого понятия является приведённый момент или приведённое количество движения маховика.

Машина под действием определённых сил приходит в определённое состояние движения, в результате которого каждая точка механизма обладает определённой скоростью. Выберем в механизме какую-нибудь точку, называемую точкой приведения. Если скорость каждой точки механизма является линейной функцией точки приведения, то движение механизма можно получить, приложив действующие силы к этой точке и сосредоточив в этой точке определённую массу, лишив таковой все остальные точки механизма. Количество движения этой точки и будет приведённым моментом.

Максвелл полагает, что «связь между током и окружающим его электромагнитным полем заключается в том, что ток наделён известным количеством движения совершенно таким же образом, как связь между точкой передачи машины и маховиком наделяет точку передачи добавочным количеством движения маховика, приведённым к точке передачи»¹.

Исходя из этой динамической аналогии, Максвелл пишет уравнения токов в цепях с учётом электродвижущих сил индукции. Это известные обобщённые уравнения Кирхгофа, причём количество движения контура складывается из произведений коэффициентов индукции на соответствующие силы тока. Таким образом электромагнитный момент тока, или количество движения, — это магнитный поток, сцеплённый с данным контуром тока.

Максвелл разрабатывает методы определения коэффициентов индукции, в частности свой известный мостовой метод и измерение потока баллистическим методом.

Разработав методы экспериментального определения фундаментального понятия теории, Максвелл переходит к установлению основных уравнений теории. Попутно им определяются основные понятия теории.

Электрическим током в данной точке Максвелл называет векторную величину, составляющая которой по оси x (соответственно y , z) равна количеству электричества, проходящему в единицу времени через единицу площадки, перпендикулярной оси x . Следовательно, максвелловское понятие тока в данной точке совпадает с понятием вектора плотности тока. Составляющие этого вектора Максвелл обозначает p , q , r .

Далее Максвелл определяет электрическое смещение. «Электрическое смещение заключается в противоположной электризации сторон молекулы или частицы тела, которая может сопровождаться или не сопровождаться прохождением электричества через тело». Смещение характеризуется векторной величиной, составляющая которого по оси определяется количеством смещения электричества, обнаруживаемого на единице площадки, перпендикулярной оси. Составляющие смещения Максвелл обозначает f , g , h . «Изменения электрического смещения должны быть прибавлены к токам

¹ Дж. К. Максвелл, Избр. соч., стр. 265.

p, q, r , чтобы получить общее движение электричества, которое мы будем обозначать через p', q', r' , так что

$$p' = p + \frac{df}{dt}; \quad q' = q + \frac{dg}{dt}; \quad r' = r + \frac{dh}{dt} \quad (A)$$

Уравнения (A) определяют полный ток в веществе¹. В современных обозначениях

$$\bar{j}_{полн} = \bar{j}_{пров} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t}.$$

Электродвижущей силой в данной точке Максвелл называет вектор, составляющая которого по оси x «представляет разность потенциалов на единицу длины проводника, помещённого в направлении x в данной точке». Таким образом, вектор электродвижущей силы в данной точке совпадает с вектором напряжённости поля. Составляющие этого вектора Максвелл обозначает P, Q, R .

Электромагнитный момент, или электромагнитное количество движения в данной точке, есть вектор, составляющая которого по оси x «является общим импульсом электродвижущей силы в направлении x , которая получилась бы при удалении магнитов или токов из поля». Составляющие этого вектора Максвелл обозначает F, G, H . Они связаны с электродвижущей силой в точке, возникающей при изменении магнитного состояния в этой точке. По определению

$$F = \int P dt,$$

так что

$$P = -\frac{dF}{dt}; \quad Q = -\frac{dG}{dt}; \quad R = -\frac{dH}{dt}.$$

В современной теории электромагнитное количество движения в точке это вектор — потенциал A и последние равенства в современной форме принимают вид:

$$\bar{E} = -\frac{\partial \bar{A}}{\partial t}.$$

Фарадеевское электротоническое состояние характеризуется магнитным потоком, сцеплённым с контуром тока. Эту величину Максвелл называет электромагнитным количеством движения контура:

$$\int \left(F \frac{dx}{ds} + G \frac{dy}{dt} + H \frac{dz}{dt} \right) dS.$$

Линейный интеграл может быть преобразован в интеграл по поверхности, который будет представлять полное число магнитных силовых линий, охваченных контуром.

Для характеристики магнитного состояния вводится вектор магнитной силы, определяемый силой, «действующей на единицу магнетизма в данной точке». Составляющие этого вектора Максвелл обозначает α, β, γ .

Коэффициентом магнитной индукции μ называется «отношение магнитной индукции в данной среде к магнитной индукции в воздухе при равной намагничивающей силе». «Тогда число силовых линий, проходящих через единицу площади, перпендикулярно к x , будет

¹ Дж. К. Максвелл, Избр. соч., стр. 289.

$\mu\alpha$. «Выражая в приведённых обозначениях электромагнитное количество движения элементарных контуров, перпендикулярных к трём осям, мы получаем следующие уравнения магнитной силы:

$$\begin{aligned}\mu\alpha &= \frac{dH}{dy} - \frac{dG}{dz}; \quad \mu\beta = \frac{dF}{dz} - \frac{dH}{dx}; \\ \mu\gamma &= \frac{dG}{dx} - \frac{dF}{dy}.\end{aligned}\quad (B)$$

В современных обозначениях уравнение (B) принимает вид

$$\bar{B} = \mu \bar{H} = \text{rot } \bar{A}.$$

Затем Максвелл устанавливает уравнения токов, которые являются первым основным уравнением теории. Максвелл исходит из факта, что работа, совершаемая при обходе единичным магнитным полюсом замкнутого пути, равна нулю, если этот путь не охватывает тока, и пропорциональна силе тока, если путь охватывает ток. Отсюда уравнения токов:

$$\frac{d\gamma}{dy} - \frac{d\beta}{dz} = 4\pi p'; \quad \frac{d\alpha}{dz} - \frac{d\gamma}{dx} = 4\pi q'; \quad \frac{d\beta}{dx} - \frac{d\alpha}{dy} = 4\pi r'.$$

В современных обозначениях

$$\text{rot } \bar{H} = 4\pi \bar{j}_{\text{полн}}.$$

Электродвижущая сила в контуре определяется криволинейным интегралом

$$\xi = \int \left(P \frac{dx}{dy} + Q \frac{dy}{ds} + R \frac{dz}{ds} \right) ds.$$

Отсюда для неподвижного контура получают уравнения:

$$P = -\frac{dF}{dt} - \frac{d\psi}{dx}; \quad Q = -\frac{dG}{dt} - \frac{d\psi}{dy}; \quad R = -\frac{dH}{dt} - \frac{d\psi}{dz}.$$

В современных обозначениях

$$\bar{E} = -\frac{\partial \bar{A}}{\partial t} - \text{grad } \psi.$$

Функция ψ — электрический потенциал в данной точке.

Компоненты электродвижущей силы в движущемся проводнике определяются уравнениями:

$$P = \mu\gamma \frac{dy}{dt} - \mu\beta \frac{dz}{dt}$$

и аналогично для других компонент.

Полные уравнения электродвижущей силы имеют вид:

$$\begin{aligned}P &= \mu \left(\gamma \frac{dy}{dt} - \beta \frac{dz}{dt} \right) - \frac{dF}{dt} - \frac{d\psi}{dx}; \\ Q &= \mu \left(\alpha \frac{dz}{dt} - \gamma \frac{dx}{dt} \right) - \frac{dG}{dt} - \frac{d\psi}{dy};\end{aligned}\quad (D)$$

$$R = \mu \left(\beta \frac{dx}{dt} - \alpha \frac{dy}{dt} \right) - \frac{dH}{dt} - \frac{d\psi}{dz}.$$

В современных обозначениях

$$\bar{E} = [\bar{V}\bar{B}] - \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} - \text{grad } \psi.$$

По поводу уравнений (D) необходимо заметить следующее. Они представляют собой второе основное уравнение теории Максвелла, которое, как известно, в векторной форме имеет вид:

$$\text{rot } \bar{E} = - \frac{\partial \bar{B}}{\partial t}.$$

В такой форме они были написаны Максвеллом в работе «О физических линиях силы», но в дальнейшем Максвелл писал их в форме (D), которая, как, повидимому, он считал, лучше иллюстрирует динамические связи поля (сила инерционной реакции пропорциональна скорости изменения количества движения).

Общеупотребительная ныне форма была установлена Герцем и Хевисайдом и была внесена в третье издание «Трактата» Дж. Дж. Томсоном.

Уравнения (C) и (D) образуют костяк теории. К ним присоединяются так называемые «уравнения материи». Электрические свойства диэлектрика характеризуются уравнениями электрической упругости, которые для изотропного диэлектрика имеют вид:

$$P = kf; \quad Q = kg; \quad R = kh.$$

В современных обозначениях:

$$\bar{E} = k\bar{D}; \quad k = \frac{4\pi}{\epsilon}.$$

Проводящие свойства вещества характеризуются электрическим сопротивлением. Уравнения электрического сопротивления в изотропном проводнике имеет вид:

$$P = -\rho p; \quad Q = -\rho q; \quad R = -\rho r.$$

Это — закон Ома для точки:

$$\bar{j}_{\text{провод}} = \frac{1}{\rho} \bar{E}.$$

Наконец в теорию входит связь между электричеством и полем. Количество свободного электричества в данной точке не что иное, как объёмная плотность зарядов. Она связана с электрическим смещением уравнением свободного электричества:

$$e + \frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial g}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial z} = 0. \quad (G)$$

В современных обозначениях:

$$\text{div } \bar{D} = 4\pi\rho.$$

В проводящей среде имеет место уравнение непрерывности

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \frac{dp}{dx} + \frac{dq}{dy} + \frac{dr}{dz} = 0 \quad (H)$$

или

$$\operatorname{div} j + \frac{\partial p}{\partial t} = 0.$$

Двадцать уравнений ($B-H$) содержат двадцать переменных, характеризующих электромагнитные процессы, и, следовательно, образуют систему, достаточную для определения этих величин.

Физическое содержание в эти уравнения вкладывается определением внутренней энергии электромагнитного поля. Она может быть выражена либо уравнением

$$\epsilon = \frac{1}{2} \Sigma (Fp' + Gq' + Hr') dv,$$

где сумма распространена по всему пространству, занятому токами, либо выражением:

$$\epsilon = \frac{1}{8\pi} \Sigma (\alpha\mu\alpha + \beta\mu\beta + \gamma\mu\gamma) dv.$$

Тем самым теория полностью построена.

Максвелл указывает в заключение, что если раньше он описывал гипотетический механизм для объяснения электромагнитных явлений, то теперь он избегает механических гипотез и пользуется понятиями «электромагнитное количество движения», «электрическая упругость» «только для того, чтобы направить мысль читателя на механические явления, которые могут помочь ему понять электрические явления». «Все подобные выражения ... должны рассматриваться как иллюстративные, а не как объясняющие».

Таким образом, Максвелл подчёркивает, что механическая форма не соответствует содержанию электромагнитной теории, и взамен этой формы предлагает математический формализм уравнений теории. Этот приём описания новых фактов в виде соответствующего математического формализма акад. С. И. Вавилов назвал «методом математической гипотезы». В современной теоретической физике этот метод получил широкое применение.

Однако энергию поля Максвелл рассматривает как чисто механическое понятие. «Всякая энергия есть то же, что механическая энергия, существует ли она в форме обычного движения или в форме упругости, или в какой-либо другой форме. Энергия в электромагнитных явлениях — это механическая энергия».

Новым в теории является вопрос о локализации энергии. По старой теории «она находится в наэлектризованных телах, проводящих цепях и магнитах в форме неизвестного качества, называемого потенциальной энергией или способностью производить определённые действия на расстояниях. По нашей теории она находится в электромагнитном поле ... и проявляется в двух различных формах, которые... могут быть описаны... согласно весьма вероятной гипотезе как движение и напряжение одной и той же среды»¹.

¹ Дж. К. Максвелл, Избр. соч., стр. 301 (далее будем снова ссылаться на страницы этой книги).

Однако общие положения теории «независимы от этой гипотезы, так как они выведены из экспериментальных фактов». Этими фактами являются индукционные явления, распределение магнитной напряжённости сообразно изменениям магнитного потенциала и электростатическая индукция в диэлектрике.

Сделанные обобщения позволяют решать конкретные задачи теории электромагнитных процессов. Максвелл вычисляет силы электрических, магнитных и электромагнитных взаимодействий и находит результаты, совпадающие с результатами теорий дальнего действия. Это показывает, что новая теория обладает по крайней мере мощностью старых теорий, равноценна им.

Но теория Максвелла даёт и нечто новое. Этому новому посвящена шестая часть работы, носящая название «Электромагнитная теория света».

Предметом этой части является исследование вопроса, «являются ли свойства того, что составляет электромагнитное поле, которые выведены только из электромагнитных явлений, достаточными для объяснения распространения света через ту же самую субстанцию» (стр. 317). Для ответа на этот вопрос Максвелл рассматривает плоскую волну, считая все электромагнитные величины функциями величины

$$w = lx + my + nr - vt.$$

Здесь l , m , n — направляющие косинусы луча, V — скорость распространения волны.

Из уравнений теории следует, во-первых:

$$lx + m\beta + n\gamma = 0,$$

т. е. направление вектора магнитной силы перпендикулярно направлению распространения волны, т. е. электромагнитные волны поперечны.

Второй важный вывод — скорость распространения волны V определяется электрическими и магнитными свойствами среды

$$V = \pm \sqrt{\frac{k}{4\pi\mu}}.$$

Для воздуха $V = v$, где v — отношение электрических и магнитных единиц.

Максвелл рассматривает только магнитный вектор волны («магнитное возмущение») и рассматривает факт совпадения оптической константы V , определённой из опытов Физо, с электромагнитной константой v , определяемой из опытов Вебера и Кольрауша, как доказательство того, что свет и магнетизм являются проявлением одной и той же субстанции и что свет является электромагнитным возмущением, распространяющимся через поле в соответствии с законами электромагнетизма.

Далее, «наука об электромагнетизме ведёт к совершенно таким же заключениям, как и оптика в отношении направления возмущений, которые могут распространяться через поле; обе эти науки утверждают поперечность этих колебаний и обе дают ту же самую скорость распространения» (стр. 325).

Наконец, электромагнитная теория устанавливает связь между оптическими и электрическими характеристиками среды. Удельная индуктивная ёмкость D (т. е. диэлектрическая проницаемость ϵ) связана с показателем преломления соотношением:

$$D = \frac{i^2}{\mu},$$

где i — показатель преломления.

Связь между оптическими свойствами вещества Максвелл пытается проследить, рассматривая поведение электромагнитных волн в кристалле и принимая, что оси магнитной индукции совпадают с осями электрической упругости. Существующие экспериментальные данные ещё недостаточны для подтверждения теории.

Далее из теории вытекает, что проводники должны быть непрозрачными. Однако некоторые электролиты прозрачны, и золото, серебро и платина в тонких листках пропустят свет. «Этот результат не может быть примирён с электромагнитной теорией света, если только не предположить, что имеется меньшая потеря энергии, когда электродвижущая сила меняется с частотой колебания света, чем когда она изменяется в течение заметных промежутков времени, как это имеет место в наших опытах» (стр. 330).

Это первое указание Максвелла на то, что несовпадение результатов в оптических и электрических экспериментах не может рассматриваться как опровержение теории, поскольку электромагнитные измерения производятся в статических или медленно меняющихся полях, а свойства вещества могут меняться с частотой.

Последний раздел работы Максвелла посвящён методам определения коэффициента самоиндукции и связан с работами Максвелла в Комитете Британской ассоциации по установлению электрических единиц. В лице Максвелла наука об электричестве имела выдающегося теоретика и практика:

«Трактат
по электричеству
и магнетизму».

В 1873 г. (предисловие к книге датировано 1 февраля 1873 г.) вышел знаменитый «Трактат по электричеству и магнетизму», явившийся вершиной научного творчества Максвелла.

Максвелл работал над этим фундаментальным трудом около восьми лет, прекратив с 1865 по 1871 г. всякую служебную деятельность. Его книга является подлинной энциклопедией науки того времени; в ней суммированы и обобщены результаты напряжённой работы экспериментаторов, практиков и теоретиков более чем за полуторавековой период изучения электрических и магнитных явлений.

Максвелл в своём труде стремился сочетать теорию с практикой и уделяет много места вопросам практических измерений, придавая им принципиальное значение. Его основной целью является «методическое обозрение всего предмета, в котором также было бы показано, как каждая часть исследуемой области приводится к возможности быть проверенной методами физического измерения» (стр. 348).

Но не только в этом заключается цель и значение фундаментального труда Максвелла.

Трактат завершается изложением новой теории, которую сам Максвелл скромно расценивал как математическое изложение метода Фарадея. Эта теория придала науке об электричестве дедуктивный характер, аналогичный механике Ньютона. «Методы Фарадея, — говорит Максвелл, — походили на те, при которых мы начинаем с целого и приходим к частному путём анализа, в то время как обычные математические методы были основаны на принципе движения от частных и построения целого путём синтеза» (стр. 319). С этого момента явления, изучаемые микроскопической электродинамикой, можно было рассматривать, исходя из уравнений Максвелла, аналитическим путём. Законы электростатики, магнетостатики, электромагнетизма, найденные индуктивным путём, содержатся в новой теории как частный случай.

Но структура книги не соответствует этому замыслу. Она отличается в этом отношении от предыдущих работ, в которых Максвелл выступает как творец новой теории.

В первых двух частях трактата, составляющих содержание первого тома, и большей половины второго тома изложение ведётся индуктивным путём, рассматриваются эксперименты и теория частных явлений электростатики, электрокинематики (тока) и магнетизма. Максвелл широко использует работы своих предшественников и современников: Кулона, Пуассона, Остроградского, Грина, Гаусса, Ампера, Неймана, Вебера, Кирхгофа и Томсона. Эти авторы разрабатывали математическую теорию электрических и магнитных явлений, исходя из концепций дальнего действия. Но, используя эти результаты, Максвелл, как он сам говорит об этом, выступает в качестве адвоката новой теории и показывает, что математическая мощь метода Фарадея не ниже, а выше старых методов. Этот метод, указывает Максвелл, «хотя может показаться в отдельных разделах менее определённым, по моему мнению более точно соответствует фактическому состоянию наших знаний, как в том, что утверждается, так и в том, что остаётся ещё нерешённым» (стр. 351).

В этом скромном утверждении уже можно видеть, что Максвелл ясно понимает всё значение своей теории, полнее и глубже отражающей специфические внутренние взаимосвязи электромагнитных явлений, чем все современные ему теории. Он и обосновывает её теперь иначе.

В предыдущих работах за динамической моделью как бы исчезла специфика электричества. Теперь Максвелл подчёркивает, что связь электричества с динамикой носит внешний, формальный характер, характер математической модели. Эта связь очень важна, и Максвелл стремится «по возможности яснее освоить связь математической формы этой теории и общей динамики с тем, чтобы в известной степени подготовиться к определению тех динамических закономерностей, среди которых нам следовало бы искать иллюстрации или объяснения электромагнитных явлений».

Последователи и эпигоны максвелловской теории рассматривали это указание Максвелла, равно как и динамические модели, развитые в первых трудах, как призыв к механическому объяснению электричества, в котором якобы и заключается главная цель теории. Несовершенство и незаконченность теории усматривали в том, что не было строгого механического вывода уравнений Максвелла. Многие современные авторы, поверив на слово эпигонам, твердили о «механицизме» Максвелла и ставили в особую заслугу Эйнштейну то, что он выбыл почву из-под всяких попыток механической интерпретации максвелловских уравнений. Но они забывают, что никто другой, как Максвелл, вслед за Фарадеем утверждал, что динамические модели только иллюстрация, что связь электромагнетизма с динамикой внешняя и что внутренние закономерности электромагнетизма богаче и сложнее этих внешних связей и в раскрытии их, этих специфических различий, и заключается источник научного прогресса.

Максвелл указывает, что «*внутренние взаимосвязи различных отраслей подлежащей нашему изучению науки* (электромагнетизма. — П. К.) *значительно более многочисленны и сложны, чем любой до сих пор разработанной научной дисциплины*» (стр. 346).

Внешние связи науки об электричестве, с одной стороны, с динамикой, а с другой стороны — с явлениями тепла, света, химического действия и внутренним строением тел, повидимому, *указывают на особую её важность как науки, помогающей объяснить природу*» (курсив мой. — П. К.).

Значит, по Максвеллу, электромагнитные законы глубже, чем законы механики, вскрывают взаимосвязи явлений природы, и именно они, а не механика помогают объяснить природу. «Исходя из этого, мне представляется,— пишет Максвелл,— что изучение электромагнетизма во всех его проявлениях как средства движения науки вперёд сейчас приобрело первостепенную важность» (курсив мой.— П. К.) (стр. 346).

Прошло более восьмидесяти лет с тех пор, как были написаны одним из творцов науки об электричестве эти строки, а сказанное в них не только не устарело, а приобрело особую свежесть и актуальность. В социалистическом обществе, в котором воплощаются в жизнь труды и мысли гениев человечества изучение электромагнетизма во всех его проявлениях, «как средство движения науки вперёд приобретает первостепенную важность».

Мы не будем излагать содержания «Трактата», охватывающего огромный круг фактов и теорий. «Трактат» состоит из двух томов и четырёх частей. Первый том, содержащий Предисловие, вводную главу и две первые части, посвящён электростатике и электрическому току. Второй том состоит из двух частей; часть третья посвящена магнетизму, часть четвёртая и последняя—электромагнетизму.

Как уже отмечалось выше, Максвелл придавал большое научное и практическое значение измерениям. Системы единиц, измерительные методы и инструменты занимают важное место в каждой части труда. Вводная глава содержит учение о размерности и мерах; последняя, тринадцатая глава первой части посвящена описанию электростатических инструментов. Во второй части одиннадцатая глава посвящена измерению электрического сопротивления. Магнитным измерениям посвящена седьмая глава третьей части. Но особенно много места посвящено мерам и измерениям в четвёртой части, где этот вопрос имеет принципиальное значение.

Непосредственно за главой, содержащей общие уравнения теории, идёт десятая глава, трактующая о размерностях электрических единиц. Двадцатой главе, содержащей основы электромагнитной теории света, предпослано пять «измерительных» глав: глава 15 — «Электромагнитные приборы», глава 16 — «Электромагнитные измерения», глава 17 — «Электрические измерения коэффициентов индукции», глава 18 — «Определение сопротивления в электромагнитных единицах», глава 19 — «Сравнение электростатических и электромагнитных единиц».

Автор теории хорошо понимал нужды практики и вместе с тем необходимость строгого и точного контроля теории числом и мерой. Поэтому-то его «Трактат», как справедливо указывал русский физик И. И. Боргман, был настольной книгой для всякого, занимающегося электричеством.

Новое содержание не укладывалось в старую форму. Максвелл уделил большое внимание поискам формы адекватной новой теории и нашёл её в векторном анализе.

В поисках формы изложения новых научных идей ярко отразилась та черта научного творчества Максвелла, которую он заимствовал у Фарадея

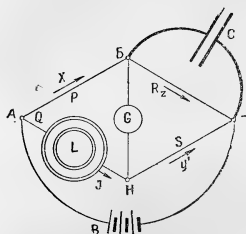


Рис. 81. Мостовая схема
(рисунок Максвелла)

и которая роднит его с великими русскими естествоиспытателями, а именно — демократизм в науке. Формальные математические методы профессионалов учёных, технический язык теоретиков не должны, по мнению Максвелла, являться самоцелью или служить барьером для понимания научных истин. О математических трактатах профессионалов он не без иронии писал:

«Существует также значительное количество имеющих большое значение в науке об электричестве, но лежащих без движения в объёмистых трудах научных обществ математических работ. Они не образуют связной системы, обладают очень различными достоинствами и в большинстве случаев понятны только профессионалам математикам» (стр. 348).

Максвелл же имеет в виду в первую очередь интересы людей дела, тех, кто сталкивается лицом к лицу с подлежащими измерению величинами. Математика для него не самоцель, не средство наслаждения математическими тонкостями, а о р у д и е п о з н а н и я. Поэтому он говорит: «Насколько возможно, я буду избегать вопросов, которые хотя и могут явиться предметом полезных упражнений для математиков, но не в состоянии расширить наших научных знаний» (стр. 346).

Вполне понятно, что Максвелл не симпатизирует укрепившимся в среде теоретиков традициям представлять теорию в законченной форме, скрывающей искания и блуждания, явившейся на свет, как Афина из головы Зевса. В этом отношении характерна его оценка методов Ампера (которого он высоко ценил как учёного) и Фарадея. Мы приводим целиком это важное место из «Трактата».

«Экспериментальные исследования, которыми Ампер установил законы механического взаимодействия между электрическими токами, являются одним из наиболее блестящих достижений науки.

Всё в совокупности, и теория и эксперимент, как будто появилось в полной зрелости и в полном вооружении из головы «Ньютона электричества». Эти исследования закончены по форме, идеальны по точности и резюмированы в формуле, из которой могут быть выведены все явления и которая навсегда должна остаться фундаментальной формулой электродинамики». «Метод Ампера, однако, хотя и изложен в индуктивной форме, не позволяет нам проследить процесс образования и развития идей, которыми он руководствовался. Мы с трудом можем поверить, что Ампер в действительности открыл закон взаимодействия при посредстве описываемых им экспериментов. Мы вынуждены подозревать, в чём, впрочем, признаётся сам Ампер, что закон открыт им при помощи некоего процесса, который он нам не показывает, и что когда была построена законченная теория, он удалил все следы лесов, при помощи которых здание теории было возведено.

Фарадей, напротив, показывает нам свои как неудачные, так и удачные эксперименты, как свои несозревшие идеи, так и идеи разработанные, и читатель, сколь бы ни был ниже его по своей способности индуктивного мышления, чувствует скорей симпатию, чем восхищение, и приходит к искушению поверить в то, что при случае он также сделал бы эти открытия. Поэтому каждому изучающему следовало бы читать исследования Ампера, как блестящий образец научного стиля при изложении открытия, но ему следовало бы также изучить Фарадея для воспитания научного духа на той борьбе противоречий, которая возникает между новыми фактами, изучаемыми Фарадеем, и идеями, рождающимися в его собственном мозгу (курсив мой.— П. К.).

Возможно, что для науки было большим преимуществом то обстоятельство, что Фарадей не был профессиональным математиком, хотя и был хо-

рошо знаком с основными идеями пространства, времени и силы. У него не было соблазна входить во многие интересные изыскания в области чистой математики, которых потребовали бы его открытия, если бы они были представлены в математической форме, и он ни при одном из своих открытий не чувствовал потребности втиснуть полученные результаты в приемлемую для математических требований его времени форму или выразить их в такой форме, которую математики могли бы оспаривать. Таким образом, он имел возможность спокойно делать свою собственную работу, координировать свои идеи с полученными им фактами и высказывать их обычным нетехническим языком».

Эта оценка тем более интересна, что сделана таким выдающимся математиком, каким был сам Максвелл. Его чутьё математика и дало ему возможность найти этот математический язык, который наиболее точно и наглядно отражает взаимосвязи электромагнитных явлений.

В своё время Ньютону для отражения законов механики потребовался язык дифференциального и интегрального исчисления. Теперь Максвелл для отражения законов электричества использует язык векторного исчисления. Он заимствует этот язык из исчисления кватернионов, разработанного ирландским математиком и механиком Гамильтоном.

Гамильтон, предвосхищая будущий четырёхмерный формализм Минковского, дал обобщение понятия комплексного числа в виде совокупности четырёх чисел t, x, y, z , названной им кватернионом и имеющем форму $t + ix + jy + kz$. Число t названо им скалярной частью, а обобщение мнимой части $ix + jy + kz$ — векторной частью. При этом

$$i^2 = j^2 = k^2 = -1; \quad jk = i; \quad ki = j; \quad ij = k; \quad kj = -i; \quad ik = -j; \quad ji = -k.$$

Векторная часть может быть геометрически интерпретирована как радиус-вектор точки, длина которого

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}.$$

Поэтому вектором называется совокупность трёх чисел

$$\mathfrak{A} = ia + jb + cz.$$

Длину вектора Максвелл обозначает

$$T\mathfrak{A} = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2}.$$

Произведение двух векторов

$$\begin{aligned} \mathfrak{A} \cdot \mathfrak{B} &= (ia + jb + kz)(ix + jy + kz) = \\ &= -(ax + by + cz) + i(bz - cy) + j(cx - az) + k(ay - bz) = \\ &= S \cdot \mathfrak{A}\mathfrak{B} + v\mathfrak{A}\mathfrak{B}. \end{aligned}$$

Скалярное или внутреннее произведение:

$$S \cdot \mathfrak{A}\mathfrak{B} = -(ax + by + cz).$$

Векторное или внешнее произведение:

$$v \cdot \mathfrak{A} \cdot \mathfrak{B} = i(bz - cy) + j(cx - az) + k(ay - bz).$$

Во времена Максвелла и после среди математиков наблюдалось увлечение кватернионами, было образовано международное общество кватер-

нионов. Максвелл не разделял формалистических увлечений кватернионистов и взял только то, что отражало физическую сущность явлений.

Векторы Максвелл разделил на два класса. Аналогом первого класса был вектор силы, криволинейный интеграл которого имел значение работы. Важную роль в теории играет криволинейный интеграл таких векторов по замкнутому пути — циркуляция вектора.

$$p = - \int \mathfrak{M} \cdot d\rho = \int (Fdx + Gdy + Hdz);$$

$$\mathfrak{M} = iF + jG + kH; d\rho = idx + jdy + kdz.$$

В современных обозначениях

$$c = \int (\overline{A} ds) = \int (A_x dx + A_y dy + A_z dz).$$

К таким векторам относятся векторы напряжённости электрического и магнитного полей H и E . Аналогом второго класса векторов является вектор скорости частицы жидкости в стационарном потоке. Здесь важную роль играет поток вектора через поверхность:

$$N = \int_s v_n ds.$$

К таким векторам относятся векторы электрической и магнитной индукции D и B . Электрические векторы первого класса измеряются с помощью сил, действующих на пробные заряды, полюса магнитной стрелки. Электрические векторы второго класса измеряются потоком через площадку, который измеряется количеством электричества, индуцированного на проводящем кружке в случае электрического вектора индукции (смещения по Максвеллу) и количеством индуцированного электричества в катушке в случае магнитного вектора индукции. Эти две пары векторов и описывают процессы в электромагнитном поле, а основные уравнения теории выражают взаимосвязи между этими величинами.

Эти основные уравнения Максвелл теперь уже не выводит из воображаемого механизма или модели движения жидкости, они представлены читателю в форме некоторой обобщающей математической гипотезы.

Исходным пунктом теории электромагнитных явлений у Максвелла является аналогия замкнутого тока и магнитного листка, найденная ещё Ампером.

Динамические действия токов Максвелл разбивает на два класса, одни действия описываются с помощью обычного механического понятия силы, другие — с помощью электродвижущих сил. Эти два класса сил Максвелл строго различает. Подчёркивая, что нам ещё ничего не известно о природе той сущности, которую мы называем электричеством, и об её связи с обычной весомой материей, Максвелл указывает, что также неисследованным остаётся вопрос о связи механических сил, действующих на весомую материю проводников, и электродвижущих сил, действующих только на электричество. Бесспорно, однако, одно, что электромагнитные явления обусловлены некоторыми энергетическими превращениями, и к току вполне приложимо понятие энергии, которое Максвелл считает чисто динамическим понятием. Энергию тока Максвелл, основываясь, повидимому, на своих предыдущих моделях, считает к и н е т и ч е с к о й.

Анализируя процессы индукции и в особенности самоиндукции, Максвелл приходит к выводу, что фарадеевское электротоническое состояние, проявляющееся в этих процессах, описывается величиной, являющейся

Первый ряд координат описывает геометрическую конфигурацию проводников — это могут быть декартовы или иные координаты. Их Максвелл обозначает буквами $x_1, x_2, \dots$, причём число этих координат равно числу степеней свободы описываемой системы. Наряду с этими переменными ток как носитель новых динамических свойств описывается чисто электрическими координатами $y, y_2, \dots$, которые имеют значение количеств электричества, протекающих в контурах в данный момент времени с некоторого начального момента. Тогда обобщённые скорости, соответствующие этим координатам, будут не чем иным, как силами токов, текущих в контурах.

Далее Максвелл пишет выражение энергии системы: «Система, содержащая электрический ток, являетсяместилищем энергии некоторого рода и, поскольку мы можем мыслить электрический ток только в качестве явления кинетического характера, его энергия должна быть кинетической».

Кинетическая энергия это квадратичная функция скоростей. В соответствии с двумя рядами переменная энергия напишется в виде:

$$T = \frac{1}{2} \left\{ (x_1 x_1) \dot{x}_1^2 + (x_1 x_2) \dot{x}_1 \dot{x}_2 + \dots + (x_1 x_k) \dot{x}_1 \dot{x}_k + \dots + (x_i y_1) \dot{x}_i \dot{y}_1 + (x_i y_2) \dot{x}_i \dot{y}_2 + \dots + (x_i y_k) \dot{x}_i \dot{y}_k + \dots + (y_1 y_2) \dot{y}_1^2 + (y_1 y_2) \dot{y}_1 \dot{y}_2 + \dots + (y_i y_k) \dot{y}_i \dot{y}_k + \dots \right\}^1.$$

Коэффициенты $(x_i x_k)$, $(x_i y_k)$, $(y_i y_k)$ в случае одинаковых индексов носят название моментов инерции, в случае различных индексов — произведений инерции. Обобщённая сила определяется уравнениями Лагранжа $\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial T}{\partial x} = X'$, где под x понимается обобщённая координата x_i, y_i .

Обобщённые координаты y_i в выражение энергии не входят, ибо при постоянных токах ($\dot{y}_i = \text{const}$) и при неизменной конфигурации проводников энергия системы не меняется с течением времени, хотя $y(t)$ непрерывно растут со временем. Разобьём T на три части

$$T = T_m + T_{me} + T_e,$$

где $T_m = \frac{1}{2} \left\{ (x_1 x_2) \dot{x}_1^2 + (x_1 x_2) \dot{x}_1 \dot{x}_2 + \dots \right\}$ — обычная механическая энергия.

$$T_{me} = \frac{1}{2} \left\{ (x_1 y_1) \dot{x}_1 \dot{y}_1 + (x_2 y_2) \dot{x}_2 \dot{y}_2 + \dots \right\}.$$

Энергия, зависящая от механических и электрических скоростей и

$$T_e = \frac{1}{2} \left\{ (y_1 y_2) \dot{y}_1^2 + (y_1 y_2) \dot{y}_1 \dot{y}_2 + \dots \right\},$$

где коэффициенты $(x_i x_k)$, $(x_i y_k)$, $(y_i y_k)$ зависят только от конфигурации проводников, но не от зарядов и токов.

¹ Символы Максвелла $(x_i y_k)$, $(y_i y_k)$ не следует рассматривать как функции только тех переменных, которые указаны в скобках.

В соответствии с выражением энергии обобщённая сила X' может быть разбита на сумму трёх сил

$$X' = X'_m + X'_e + X'_{me}.$$

Первая часть

$$X'_m = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T_m}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{dT_m}{dx}$$

— обычная механическая сила, необходимая для сообщения ускорения массам проводников.

Вторая часть

$$X'_e = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T_e}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{dT_e}{dx} = - \frac{dT_e}{dx}$$

это внешняя механическая сила, которая должна быть приложена, чтобы уравновесить возникающую при движении проводника электромагнитную силу

$$X_e = \frac{dT_e}{dx}.$$

Таким образом, «электромагнитная сила, стремящаяся увеличить какую-нибудь переменную, равна скорости увеличения электромагнитной энергии при возрастании этой переменной, при условии, что токи остаются постоянными». Поэтому, если батарея, поддерживающая ток постоянным, работает при движении проводников, при котором совершается работа ω , то она доставляет системе энергию 2ω .

Максвелл подробно дискутирует третью слагающую силы:

$$X'_{me} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T_{me}}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{dT_{me}}{dx}.$$

Первая часть этой силы представляет собой производную от линейной функции токов. Поэтому она равна нулю при постоянных токах и отлична от нуля при изменении силы токов.

Вторая часть — линейная функция токов, меняющая знак при изменении направления токов. Она отлична от нуля и при постоянных токах, если проводник движется. Оба члена поэтому могут быть исследованы отдельно. Но оба члена обращаются в нуль в неподвижных проводниках.

Обобщённая электрическая сила

$$Y' = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{y}} \right) - \frac{dT}{dy} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{y}} \right)$$

(так как y не входит в T) может быть также разложена на три части

$$Y' = Y'_m + Y'_e + Y'_{me}.$$

Но

$$Y'_m = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T_m}{\partial \dot{y}} \right) = 0,$$

так как $\dot{y}$ не входит в выражение T_m .

Что же касается величины

$$Y'_e = - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T_e}{\partial \dot{y}} \right)$$

и равной отрицательной производной по времени от величины

$$\frac{dT_e}{dy_1} = L_1 \dot{y}_1 + M_{12} \dot{y}_2 + M_{13} \dot{y}_3 + \dots,$$

то это электродвижущая сила индукции, открытая Фарадеем. Далее

$$Y_{me} = -\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T_{me}}{\partial \dot{y}} \right)$$

даст электродвижущую силу, равную отрицательной производной по времени от линейной функции скоростей проводников. Таким образом, эта электродвижущая сила возникает независимо от токов при всяком ускорении проводников.

Подводя итоги, можно заметить, что наличие члена T_{me} может обнаружиться при посредстве трёх эффектов:

1. Возникновение механической силы $\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T_{me}}{\partial \dot{x}} \right)$ при всяком изменении тока в проводниках.
2. Возникновение механической силы $-\frac{dT_{me}}{dx}$, меняющей знак при изменении направлений токов.
3. Возникновение индукционных э. д. с. $-\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T_{me}}{\partial \dot{y}} \right)$

при ускорении проводников.

Чтобы проверить наличие первого эффекта, Максвелл подвешивал на тонкой проволоке горизонтальную плоскую катушку с большим числом оборотов. Проволока подвеса, к которой было прицеплено лёгкое зеркальце, присоединялась к одному концу обмотки катушки; другой конец обмотки присоединялся к тонкой проволочке, представляющей как бы продолжение подвеса и опущенной в чашечку со ртутью. К подвесу и чашечке подводился ток. Замыкание и размыкание тока, его переключение не вызывало никакого движения катушки, которое должно бы быть, если бы существовал первый эффект (рис. 83).

Чтобы проверить наличие третьего эффекта, Максвелл соединял проволочку подвеса с чувствительным гальванометром и приводил катушку в неравномерное вращение. Ни при ускорении, ни при торможении катушки гальванометр не отклонялся.

Для проверки наличия второго эффекта Максвелл приводил в быстрое вращение вертикальное металлическое кольцо, несущее горизонтальную ось, вокруг которой мог свободно вращаться электромагнит. Действие магнитного поля Земли уничтожалось специальным магнитом. Через катушку с помощью специальных пружинных контактов подводился ток. Никакой силы, стремящейся изменить положение электромагнита, не было обнаружено (рис. 84).

«Если бы было открыто действие такого рода,— пишет Максвелл,— мы могли бы рассматривать один из так называемых родов электричества, или положительное, или отрицательное, как реальную субстанцию, и мы имели бы возможность описывать электрический ток как истинное движение субстанции в определённом направлении» (стр. 437).

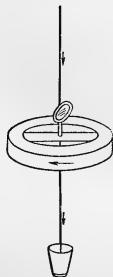


Рис. 83. Рисунок из «Трактата»

Электронная теория подтвердила это заключение, а опыты Стюарта и Толмена доказали наличие эффекта третьего рода. Максвелл же из своих экспериментов мог сделать только отрицательный вывод.

«Таким образом, мы имеем три метода обнаружения существования членов формы T_{me} , ни один из которых до сих пор (разрядка моя.— П. К.) не привёл к положительному результату. Я изложил их с большой тщательностью потому, что твёрдая уверенность касательно пункта, имеющего столь существенное значение для теории электричества, кажется мне весьма важной» (стр. 442).

Эта осторожность и проницательность Максвелла полностью оправдалась последующим развитием теории электричества. Однако в своей теории Максвелл допускает, что $T_{me} = 0$, «или по меньшей мере не даёт заметного эффекта».

Прилагая свою динамическую теорию к исследованию электрических цепей, Максвелл вновь приходит к математическому описанию электротонического состояния с помощью вектора $\mathfrak{H}$, «имеющего определённую величину и направление в любой данной точке поля. Этот вектор мы назвали электромагнитным количеством движения в данной точке. Эту величину можно рассматривать как интеграл по времени от электродвижущей интенсивности, которая была бы получена в этой точке, если бы из

Рис. 84. Рисунок из «Трактата»

поля были внезапно удалены все токи. Эта величина идентична с величиной, . . . исследованной, . . . как вектор-потенциал магнитной индукции. Его составляющие, параллельные x, y, z , суть F, G, H . Электромагнитным количеством движения контура будет линейный интеграл от $\mathfrak{H}$, взятый вдоль контура» (стр. 476—477).

Этот линейный интеграл преобразуется в поверхностный интеграл от другого вектора L с составляющими a, b, c . «Вектор L мы назвали вектором магнитной индукции, так как его свойства идентичны со свойствами линейной магнитной индукции, исследованными Фарадеем».

Связь между $\mathfrak{H}$ и L выражается уравнениями

$$a = \frac{dH}{dy} - \frac{dG}{dz}; \quad b = \frac{dF}{dz} - \frac{dH}{dx}; \quad c = \frac{dG}{dx} - \frac{\partial F}{dy}. \quad (A)$$

Электродвижущая сила в данной точке определяется уравнениями:

$$\begin{aligned} P &= c \frac{dy}{dt} - b \frac{dz}{dt} - \frac{dF}{dt} - \frac{d\psi}{dx}; \\ Q &= a \frac{dz}{dt} - c \frac{dx}{dt} - \frac{dG}{dt} - \frac{d\psi}{dy}; \\ R &= b \frac{dx}{dt} - a \frac{dy}{dt} - \frac{dH}{dt} - \frac{d\psi}{dz}. \end{aligned} \quad (B)$$

Электромагнитная сила, действующая в магнитном поле на единицу объёма проводника с током:

$$X = vc - wb; \quad Y = wa - uc; \quad Z = ub - va. \quad (C)$$

В современных обозначениях уравнения (A , B , C) принимают вид

$$\vec{B} = \text{rot } \vec{A}; \quad \vec{E} = [\vec{v} \vec{B}] - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \text{grad } \psi;$$

$$\vec{F} = [\vec{j} \vec{B}].$$

«Во всех этих случаях ток понимается как действительный ток, который включает не только ток проводимости, но и ток, происходящий вследствие изменения электрического смещения.

Введя вектор напряжённости магнитного поля $\mathfrak{H}$ с компонентами α , β , γ и вектор намагничивания y (A , B , C), Максвелл пишет уравнения намагничивания:

$$\begin{aligned} a &= \alpha + 4\pi A; & c &= \gamma + 4\pi C \\ b &= \beta + 4\pi B; \end{aligned} \quad (\text{D})$$

и в векторной форме

$$\mathfrak{B} = \mathfrak{H} + 4\pi J.$$

Далее пишутся «уравнения электрических токов»:

$$4\pi u = \frac{d\gamma}{dy} - \frac{d\beta}{dz}; \quad 4\pi v = \frac{da}{dz} - \frac{d\gamma}{dx};$$

$$4\pi w = \frac{d\beta}{dx} - \frac{da}{dy}. \quad (\text{E})$$

Из уравнений (E) получается уравнение:

$$\frac{du}{dx} + \frac{dv}{dy} + \frac{dw}{dz} = 0,$$

«которое указывает, что ток, составляющими которого являются u , v , w , подчиняется условию движения несжимаемой жидкости и что он по необходимости должен протекать по замкнутым контурам».

Это уравнение верно только в том случае, если мы будем рассматривать u , v , w как составляющие электрического потока, который включает также изменения электрического смещения наряду с током проводимости». Принцип замкнутого тока является краеугольным камнем теории.

«Мы не располагаем прямыми экспериментальными доказательствами, — говорит Максвелл, — относящимися к непосредственному электромагнитному действию токов, обусловленных изменением электрического смещения в диэлектриках, но чрезвычайная трудность согласования законов электромагнетизма с существованием незамкнутых электрических токов является одним из многих оснований, почему мы допускаем наличие мгновенных токов, возникающих в результате изменения смещения. Их важность сделается очевидной, когда мы подойдём к электромагнитной теории света» (стр. 482).

Электрическое поле в среде вызывает действия двоякого рода, «которые Фарадей назвал индукцией и проводимостью». Процесс индукции описывается вектором смещения.

Уравнение электрического смещения

$$\mathfrak{D} = \frac{1}{4\pi} K \mathfrak{E}. \quad (\text{F})$$

Уравнение проводимости (закон Ома):

$$\mathfrak{R} = c\mathfrak{E}, \quad (\text{G})$$

где $\mathfrak{R}(p, q, r)$ — вектор плотности тока, $\mathfrak{E}(P, Q, R)$ — вектор напряжённости поля («электродвижущая интенсивность»), $\mathfrak{D}(f, g, h)$ — вектор электрического смещения, k — «диэлектрическая ёмкость» (проницаемость).

В соответствии с основной предпосылкой теории полный ток:

$$\mathfrak{E} = \mathfrak{R} + \mathfrak{D} \quad (\text{H})$$

(«уравнение истинных токов»)

или в координатах:

$$u = p + \frac{df}{dt}; \quad v = q + \frac{dg}{dt}; \quad w = r + \frac{dh}{dt}. \quad (\text{H}^*)$$

Или далее

$$\mathfrak{E} = \left(c + k \frac{d}{dt} \right) \mathfrak{E}^1. \quad (\text{J})$$

При постоянных C, K (однородная, изотропная среда):

$$u = cP + \frac{1}{4\pi} k \frac{dP}{dt}; \quad v = cQ + \frac{1}{4\pi} k \frac{dQ}{dt}. \quad (\text{J}^*)$$

$$w = cR + \frac{1}{4\pi} k \frac{dR}{dt}.$$

К этим уравнениям добавляются

$$\rho = \frac{df}{dx} + \frac{dg}{dy} + \frac{dh}{dz} \quad (\text{I})$$

— выражение для поверхностной плотности электричества:

$$\sigma = lf + mg + nh + l'f' + m'g' + n'h' \quad (\text{j})$$

— выражение для объемной плотности электричества на границе двух сред, и связь между $\mathfrak{B}$ и $\mathfrak{E}$

$$\mathfrak{B} = \mu\mathfrak{E}... \quad (\text{L})$$

Уравнения (A—L) и являются общими уравнениями теории Максвелла. Их обоснованию и посвящена девятая глава четвёртой части трактата. Они появляются как результат обобщения опытных фактов и применения к электромагнитным процессам обобщённых уравнений Лагранжа.

Максвелл постулирует при этом определённую форму для энергии системы токов, которая подсказана ему предыдущими работами.

Мы не будем рассматривать всех приложений теории, а остановимся только на важнейшем следствии уравнений Максвелла — электромагнитной теории света, которой посвящена двадцатая глава четвёртой части «Трактата».

¹ Максвелл нередко пользуется символами операторов, например оператором ∇ . Уравнение (I) также записано в форме произведения оператора $\left(c + \frac{k}{4\pi} \frac{d}{dt} \right)$ на вектор $\mathfrak{E}$.

Задача «Трактата» заключалась в том, чтобы объяснить электромагнитные явления «при помощи механического действия, передаваемого от одного тела к другому при посредстве среды, занимающей пространство между этими телами». Если свойства этой среды «имеют тот же самый характер, как и свойства, которые мы приписываем светоносной среде для объяснения явлений света, то очевидность физического существования такой среды серьезно укрепляется» (стр. 550).

Одним из измеряемых свойств среды является скорость распространения возмущений в ней. «Если бы было найдено, что скорость распространения электромагнитных возмущений такова же, как и скорость света, не только в воздухе, но и в других прозрачных средах, мы получили бы серьезное основание для того, чтобы считать свет электромагнитным явлением, и тогда сочетание оптической и электрической очевидности даст такое же доказательство реальности среды, какое мы получаем в случае других форм материи на основании совокупного свидетельства наших органов чувств» (стр. 551).

Как же обстоит дело с этим основанием?

Вычисления, которые мы здесь опускаем, приводят к выводу, что скорость распространения электромагнитных возмущений в непроводящей среде

$$V = \frac{1}{\sqrt{k\mu}}.$$

В воздухе $k=1$, $\mu = \frac{1}{v^2}$; следовательно $V=v$, или «скорость распространения численно равна количеству электростатических единиц электричества в одной электромагнитной единице».

Если свет — электромагнитный процесс, то V — скорость света — определяется оптическими методами, v — отношение единиц, определяемое совершенно независимо электрическими методами. «Отсюда совпадение или несовпадение значений V и v является пробным камнем для электромагнитной теории света».

Максвелл располагает в этом отношении следующими данными:

Скорость света (в метрах в секунду)	Отношение электрических единиц (в метрах в секунду)
Физо 314 000 000	Вебер 310 740 000
Аберация и т. п.	Максвелл 288 000 000
Параллакс Солнца 308 000 000	Томсон 282 000 000
Фуко 298 360 000	

Комментируя эти данные, Максвелл пишет: «Очевидно, что скорость света и отношение единиц являются величинами одного и того же порядка. Ни об одном из них нельзя сказать, что она до сих пор определена с такой степенью точности, которая позволяла бы нам утверждать, что одна ве-

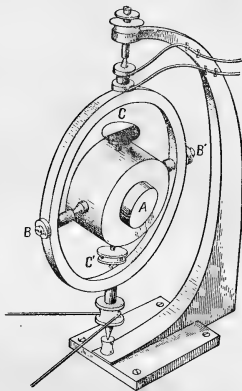


Рис. 85. Опыт Максвелла по установлению инертности электричества (рисунок из «Трактата»)

личина больше или меньше другой. Следует надеяться, что в результате дальнейших опытов отношение между размерами этих двух величин будет установлено более точно.

В то же время наша теория, утверждающая, что эти две величины равны, и выдвигающая физические основания этого равенства, безусловно не опровергается сравнениями имеющихся результатов» (стр. 557).

Итак, теория не опровергается, но и не подтверждается с достаточной убедительностью имеющимися экспериментальными данными по измерению скорости света в воздухе.

Ещё хуже обстоит дело с другими средами. Так как для большинства прозрачных сред магнитная проницаемость весьма мало отличается от магнитной проницаемости воздуха, то отличие скорости света в среде от скорости света в воздухе будет обязано различием диэлектрической проницаемости среды от воздуха. «Согласно нашей теории, следовательно, диэлектрическая ёмкость прозрачной среды должна быть равна квадрату показателя преломления» (стр. 558).

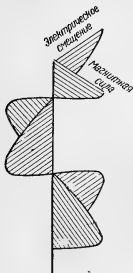


Рис. 86. К электромагнитной теории света (рисунок Максвелла)

Но показатель преломления зависит от длины волны. «Мы, следовательно, должны избрать показатель преломления, который соответствует волнам наибольших периодов, потому что они являются единственными волнами, движение которых может быть сравнено с медленными процессами, с помощью которых мы определяем ёмкость диэлектрика» (стр. 558).

Единственным диэлектриком, постоянная которого была определена во времена Максвелла, был парафин. По измерениям Гибсона и Баркля (1871) $K = 1,975$. Из измерений Гладстона показатель преломления парафина для линий A , D и H равен 1,420. Максвелл путём экстраполяции находит, что для бесконечных длин волн $n = 1,422$, в то время

как $\sqrt{K} = 1,405$. «Разница между этими числами больше, чем её можно было бы отнести за счёт ошибки наблюдателя, — комментирует Максвелл, — она показывает, что наша теория структуры тел должна быть значительно улучшена, прежде чем мы сможем выводить оптические свойства тел из их электрических свойств. В то же самое время я думаю, что совпадение чисел таково, что если не будет найдено больших расхождений между числами, выведенными из оптических и электрических свойств значительного количества веществ, мы могли бы обоснованно заключить, что квадратный корень из K , хотя он, может быть, и не является полным выражением показателя преломления, по меньшей мере является наиболее важным членом в нём» (стр. 559).

При изложении электронной теории дисперсии мы убедимся в справедливости этих значений Максвелла. Пока же следует констатировать, что во времена Максвелла не было достаточных экспериментальных подтверждений его теории.

В этой же главе Максвелл делает фундаментальный вывод, что «в среде, в которой распространяются волны, существует давление в направлении, нормальном к волнам, численно равное энергии в единице объёма». «Плоское тело, подвергающееся действию солнечного света, будет испытывать это давление только на своей освещённой стороне и, следовательно, будет отталкиваться от той стороны, на которую падает свет. Возможно, что зна-

чительно бо́льшая энергия излучения могла быть получена при помощи концентрированных лучей электрической лампы. Такие лучи, падая на тонкий металлический диск, весьма чувствительным образом подвешенный в вакууме, возможно произвели бы могущий быть наблюдаемым механический эффект» (стр. 563).

Таким образом, из теории Максвелла вытекала возможность механических эффектов света. Этот вывод имел важное принципиальное значение. Интересно, что, подсчитывая в этой главе из значения солнечной постоянной величину давления и значение напряжённости поля в солнечном луче, Максвелл фактически пользуется выражением плотности потока энергии, определяемой вектором Умова-Пойнтинга. Однако идею движения энергии Максвелл не развивает.

Характеристика метода и теории Максвелла.

Мы подошли к концу обзора истории формирования теории Максвелла. Подведём итоги. Теория Максвелла выросла из идей Фарадея об определяющей роли среды, она формировалась и развивалась в борьбе с теориями, допускающими мгновенное действие на расстояние.

Во всех теоретических построениях Максвелла ясно проглядывает стремление полнее и глубже отразить взаимосвязи электромагнитных процессов, чем это допускалось современными ему теориями электричества.

Максвелл понимал, что, делая новый шаг в познании природы электричества, он тем самым обогащает теорию познания и неоднократно касается теоретико-познавательных проблем. По высказываниям Максвелла можно составить представление о его методологических позициях.

Максвелл стоит на материалистических позициях и безусловно убежден в существовании объективных законов природы, которые могут быть познаны и отражены в научных понятиях. Познаваемость законов природы Максвелл выражает формулой простоты природы, примыкая в этом отношении к Ньютону и Ломоносову: «Природа проста и не роскошествует излишними причинами» (Ньютон). «Природа весьма проста, что этому противоречит, должно быть отвергнуто» (Ломоносов).

Эта формула ничего общего не имеет с пресловутым принципом «экономии» Маха и направлена против излишних гипотетических построений, придумывающих отдельный сложный механизм для каждой группы фактов и даже для единичного факта. В противоположность этому, Максвелл исходит из концепции е д и н с т в а п р и р о д ы, находящей своё выражение в аналогиях закономерностей различных областей физики. Поэтому Максвелл широко использует в своих теоретических построениях метод механических моделей и математических аналогий. Применяя этот метод, Максвелл и пришёл к своим знаменитым уравнениям.

Вместе с тем Максвелл постоянно подчёркивает неполноту и ограниченность аналогии и модели, указывая, что совпадения различных родов явлений являются только частичными и если встречаются случаи более полного совпадения, то они «потребуют длительных исследований для вскрытия существенных различий» (курсив мой.— П. К.). Таким образом, аналогия не исключает, а наоборот, обязывает вскрывать специфику закономерностей явлений, сходство между которыми установлено аналогией. Это требование, предъявляемое Максвеллом к аналогии и модели, необходимо иметь в виду, ибо оно имеет важное теоретико-познавательное значение в решении проблемы общего и специфического.

В современной физике и технике метод моделей и аналогий получил широкое распространение. «Поразительная аналогичность» уравнений, описывающих колебательные процессы, привела к тому, что возникла отдель-

ная научная дисциплина — «теория колебания», охватывающая широкий круг самых разнообразных явлений механики, оптики, электричества, атомной физики, астрономии и техники, на базе общего «интернационального», по выражению акад. Л. И. Мандельштама, математического языка.

Однако гиперболизация математической аналогии может привести к идеалистическому выводу о том, что теория есть совокупность понятий и уравнений и её развитие есть чистое движение понятий, а вопрос о том, отражают ли эти теории объективную реальность, «лишён смысла». «Материя исчезает — остаются уравнения», — так резюмировал эти взгляды Ленин. Максвелл своим требованием проведения длительных исследований для выяснения специфических особенностей явлений, объединяемых математической аналогией, предостерегал от таких выводов.

Другой важной методологической проблемой, которой касается Максвелл, является проблема целого и отдельного. Эту проблему Максвелл разбирает на исключительно важном для физики примере микроскопического и макроскопического подхода к явлениям природы. Характеризуя метод Фарадея, он пишет: «Мы привыкли рассматривать вселенную как состоящую из частей, и математики обычно начинают с рассмотрения отдельных частиц, затем устанавливают её отношение к другой частице и т. д. Это по общему мнению считалось наиболее естественным методом. Однако для того, чтобы создать себе представление о частице, требуется процесс абстракции, так как все наши восприятия относятся к более или менее значительным телам, так что идея *целого*, имеющаяся в нашем сознании в какой-нибудь данный момент, возможно является настолько же первичной, как и представление об индивидуальной вещи. Поэтому может существовать и математический метод, в котором мы переходим от целого к частям, вместо того чтобы идти от частей к целому» (стр. 383).

Как пример Максвелл приводит геометрические образы: точки, линии, поверхности, объёмы. Можно начинать с точки и рассматривать линию как след движущейся точки, поверхность как след линии и т. д., а можно рассматривать поверхность как границу объёма, линию как границу поверхности, точку как конец линии.

«Подобным же образом мы можем рассматривать потенциал материальной системы как функцию, найденную известным процессом интегрирования с участием масс тел, находящихся в поле, или мы можем предположить, что сами эти массы не имеют другого математического значения, чем объёмные интегралы от $\frac{1}{4\pi} \nabla^2 \psi$, где ψ есть потенциал».

«В электрических исследованиях мы можем применить формулы, в которых фигурируют такие величины, как расстояние между телами, их заряды, или токи в этих телах, или мы можем использовать формулы, в которые входят другие величины, непрерывные во всём пространстве».

«Математические операции, применяемые в первом методе, — интегрирование вдоль линий по поверхности и по ограниченным объёмам пространства, а используемые во втором методе — дифференциальные уравнения в частных производных и интегрирование по всему пространству» (стр. 384).

Максвелл, вслед за Фарадеем, отдаёт предпочтение второму способу описания, выдвигая на первый план идею непрерывного поля как целого пространственного образования; заряды и токи выступают из него как вторичное, производимое от этого целого.

Следует указать, что Максвелл ещё не смог решить проблемы целого и единичного, непрерывного и дискретного и его подход является приближённым и механическим. Следующий шаг в этом направлении был сделан

Лоренцом, однако взаимосвязь частицы и поля и по настоящее время представляет труднейшую проблему теоретической физики.

Выдвигая на первый план концепцию поля, Максвелл ещё раз подчёркивает, что среда, в которой существует это поле, «делает очевидным абсолютное единство мира во всех встречающихся в нём размерах». Крупным шагом в познании этого «абсолютного единства» явилась электромагнитная теория света Максвелла.

Охарактеризуем основные черты теории Максвелла. Эта теория характеризуется прежде всего тесной связью электричества и динамики, и не случайно основополагающая работа Максвелла носит название «Динамической теории поля». Эта связь выражается в том, что при надлежащем обобщении в теории электричества могут быть использованы динамические понятия: обобщённые координаты и скорости, функция Лагранжа, обобщённые импульсы (количества движения). Она выражается и в том, что чисто электродинамические объекты (электромагнитные волны) могут оказывать механические воздействия на тела. Сам Максвелл указал и рассчитал эффект такого рода — давление света. Вместе с тем Максвелл ещё не переносит на поле чисто механические характеристики (исключая энергии, которую он относил к механическим понятиям). Он постоянно подчёркивал, что исходное понятие его теории, которым он отражал фарадеевскую идею электротонического состояния — электромагнитный момент, — только а н а л о г и я динамического момента, что обобщённые электродвижущие силы только аналогия механических сил и принципиально отличны от последних. В связи с этим он неоднократно обращал внимание на существенное отличие сил, действующих на весомые тела.

Однако он ожидал, что будущая теория электричества прольёт свет на связь между весомой материей и электричеством и тем самым на отношение электромагнитных «сил» и «моментов» к механическим. Это и сделала электронная теория, которая установила это отношение в форме силы Лоренца и обобщила для случая поля механические понятия количества движения и момента количества движения. Об этом будет идти речь в следующих главах.

Вторая черта теории — это признание определяющей роли среды в электромагнитных процессах и связанная с этим необходимость определения электрических и магнитных характеристик среды.

Третья черта теории — это обобщение понятия тока, включающее, кроме тока проводимости, ток конвекции и особенно ток смещения. С этим обобщением тесно связан принцип замкнутости всякого электрического тока.

Четвёртая черта — наличие тесной взаимосвязи электрических и магнитных явлений, отражаемой основными уравнениями теории.

Пятая черта теории — это констатация конечной скорости распространения электромагнитных действий. Эта скорость в вакууме совпадает со скоростью света, откуда следует

шестая основная черта теории — существование в природе электромагнитных волн, частным случаем которых являются световые волны.

Мы видели, что ни одна из этих особенностей теории и ни один из её фундаментальных выводов не могли считаться обоснованными экспериментально. Всё это, наряду с новизной и сложностью теории, непривычностью её моделей, создавало серьёзные трудности в деле усвоения физикой новых идей. Предстояла длительная борьба за укрепление и развитие теории поля. В этой борьбе важную, можно сказать решающую, роль сыграла русская физика. К рассмотрению основных этапов этой борьбы мы и обращаемся.

РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИКИ В ПОСЛЕДНЕЙ ТРЕТИ XIX в. БОРЬБА ЗА ТЕОРИЮ ЭЛЕКТРО- МАГНИТНОГО ПОЛЯ.

Идейный разброд
в теории
электричества.

В конце предыдущей главы мы видели, что положение с экспериментальным подтверждением теории Максвелла было неудовлетворительным. Ни одна основная предпосылка теории, ни одно её фундаментальное следствие не могли считаться обоснованным опытом. Это в равной мере относится и к динамическим эффектам, и к следствиям электромагнитной теории света. Что же касается чисто теоретических концепций Максвелла, то они оставались для подавляющего большинства физиков, по выражению Больцмана, «книгой за семью печатями», и ещё в 1891 г. тот же Больцман предпосылал своим лекциям по теории Максвелла эпиграф из «Фауста»:

So soll ich denn mit saurem Schweiss
Euch lehren, was ich selbst nicht weiss¹.

Однако и с теориями дального действия дело обстояло не лучшим образом. Закон Вебера подвергался критике, и прежде всего вызывала сомнение его совместимость с законом энергии. Критику закона Вебера с этой точки зрения начал Гельмгольц. В 1870 г. в журнале Крелля² появилась его работа «Об уравнениях движения электричества в покоящихся проводящих телах».

Вопрос о распределении переменных токов в трёхмерных проводниках был разобран в 1857 г. Кирхгофом, написавшим уравнения движения токов, исходя из законов Вебера. Из этих уравнений вытекало, что равновесие электричества в сплошных проводниках может быть неустойчивым, и могут быть неустановившиеся токи с бесконечно нарастающей во времени силой и плотностью.

Гельмгольц положил в основу закон индукции Неймана и пришёл к противоположному выводу об установлении в проводниках стационарного состояния, при котором токи распределяются с конечной плотностью и силой. При этом Гельмгольц получил выражение для потенциала двух элементов тока $iD\zeta$ и $jD\sigma$ в виде

$$p = -\frac{1}{4} \frac{ij}{r} \{ (1+k) \cos(D\zeta, D\sigma) + (1-k) \cos(r, D\zeta) \cdot \cos(r, D\sigma) \}.$$

Эта формула включает в себе все существовавшие в это время выражения законов индукции. Потенциал Ф. Неймана, от скорости изменения которого зависит величина э. д. с. индукции, получается из формулы Гельм-

1 Я должен пот тяжёлый лить,
Чтобы научить вас тому, чего сам не понимаю.

2 «Журнал чистой и прикладной математики», издаваемый Креллем.

гольца, если положить $k = 1$. Энергия взаимодействия двух элементов тока в теории Максвелла получится, если положить $k = 0$. Потенциал Вебера получается отсюда, если $k = -1$. В этом случае возможно отрицательное значение работы и, следовательно, неустойчивость электрического состояния равновесия.

Отсюда Гельмгольц заключает, что хотя потенциал Вебера и не допускает кругового процесса с выигрышем работы, и в этом смысле совместим с законом сохранения энергии, однако он допускает возможность того, что две электрические частицы, двигаясь с конечного расстояния, могут приобрести бесконечно большие значения кинетической энергии, что несовместимо с законом энергии.

В. Вебер в 1871 г. возразил на эту критику Гельмгольца, утверждая, что вывод Гельмгольца получается, если предположить возможность выполнения следующих условий: частицы обладают скоростями, большими скорости света, и могут сблизиться на расстояние, меньшее молекулярных размеров. Условия же эти физически неосуществимы.

Гельмгольц (1872) тогда рассмотрел физически допустимый пример, а именно случай изолирующей сферической поверхности радиуса a , заряженной равномерно электричеством с плотностью σ , внутри которой движется со скоростью v частица массы m и с зарядом e . Веберовский потенциал такой системы будет

$$4\pi\sigma ae \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right),$$

и уравнение, которое даёт теория для этой частицы

$$\frac{1}{2} \left(m - \frac{4}{3} \frac{\pi a \sigma e}{c^2} \right) v^2 + 4\pi\sigma ae + V = \text{const},$$

где V — потенциал других сил, могущих действовать на частицу.

Увеличением радиуса сферы a можно получить отрицательный коэффициент при v^2 , т. е. частица будет вести себя как частица с отрицательной массой и энергией. Такая частица обладала бы парадоксальными свойствами: её энергия уменьшается при ускоряющих силах и неограниченно возрастает при силах сопротивления. В возникшей дискуссии, кроме В. Вебера, приняли участие Нейман, Целльнер, Ж. Бертран, Рикке и другие выдающиеся математики и физики того времени, однако дискуссия не привела к определённому результату. Спор перешёл в плоскость основных предпосылок теории Вебера: мгновенное действие на расстояние и допущение двух родов электричества, движущихся в противоположных направлениях.

Против второй предпосылки выступает Р. Клаузиус. «Пока не существует неопровержимых доводов в пользу допущения подобного двой-



Г. Ф. Гельмгольц

ного тока, — пишет Клаузиус, — не следует отказываться от более простого представления, что ток является течением одной только жидкости, и на основе этого представления следует объяснить действия гальванического тока»¹.

В своём труде «Механическая теория (Behandlung) электричества» Клаузиус выводит выражение электродинамического потенциала двух движущихся зарядов в виде:

$$V = k \frac{ee'}{r} vv' \cos \epsilon,$$

так что суммарный электростатический и электродинамический потенциал системы двух зарядов принимает вид:

$$V = \frac{ee'}{r} (1 + kvv' \cos \epsilon).$$

Здесь v и v' — скорости абсолютного (а не относительного, как у Вебера) движения заряжённых частиц, ϵ — угол между направлениями движения этих частиц. Абсолютное движение Клаузиус рассматривает в отношении к некоторой неподвижной среде, превосходящая таким образом лоренцовскую концепцию неподвижного эфира.

Против этого положения Клаузиуса выступил в 1877 г. Г. Л о р б е р г, который считает неприемлемой идею абсолютного движения и утверждает, что физическое действие зависит только от относительных скоростей взаимодействующих объектов, в данном случае электрических частиц.

На эту критику Клаузиус смог ответить только тем, что в случае зависимости действия только от относительных скоростей единственно возможным остаётся закон Вебера с гипотезой о двойном токе электричества. Если же не желают гипотезы двойного тока, «то нельзя и допускать, что на электродинамические силы влияет только относительное движение (всё равно, в веберовском или же обычном смысле этого слова), а следует приписать такое влияние и абсолютным движениям; в этом случае мы приходим к моему основному закону как единственно возможному»². С резкой критикой закона Вебера выступили Т о м с о н и Т э т в своём курсе натуральной философии, пользовавшемся в то время большой известностью.

Они излагают сущность теории Вебера в следующих выражениях:

«Он (т. е. Вебер) принимает, что электрический ток состоит из движения двух разнородных частиц электричества, которые пробегают по проводу в противоположных направлениях, и что эти частицы, находясь в относительном движении, развивают по отношению к другим частицам силы, отличные от тех, которые проявили бы, если бы они находились в состоянии относительного покоя. Такое допущение при настоящем состоянии науки не может быть оправдано, так как гипотезу о существовании двух электрических жидкостей отнюдь нельзя считать правильной и так как, кроме того, эти выводы находятся в противоречии с началом «сохранения энергии», которое мы на основании бесчисленного количества экспериментальных данных признаём общим законом природы. Подобные теории становятся ещё более опасными, если они случайно объясняют какие-нибудь явления, как, например, теория Вебера объясняет индукционные токи»³.

¹ Die mechanische Behandlung der Electricität. 1879, стр. 229 (цит. по Ф. Розенбергу, История физики, т. III, ч. 2, М., 1936, стр. 383).

² Ф. Розенберг, История физики, т. III, ч. 2, стр. 384.

³ Там же, стр. 384—385.

К. Нейман (1871) видоизменяет предпосылку Вебера о двойном токе, принимая, что движется только положительное электричество, а отрицательное остаётся связанным с весомой материей.

Максвелл, как мы видели, вообще считает недопустимым говорить о движении электричества как о чём-то физически определённом. «Мы знаем только, — пишет Максвелл в своём посмертном труде «Электричество в элементарном изложении», — что такой-то заряд электричества в известное время перенесён от A к B , но произошло ли это вследствие переноса положительного электричества от A к B , или отрицательного от B к A , или вследствие некоторой комбинации обоих процессов, представляет для нас вопрос неразрешимый. Точно так же мы не можем определить, насколько велика или мала скорость электричества в проволоке»¹. Это и явилось причиной того, что Максвелл вслед за Фарадеем сконцентрировал всё внимание на процессах, происходящих в окружающем ток пространстве, как вполне определимых физически.

И другие авторы (Гельмгольц, Лорберг) оказались вынужденными заявить о необходимости принимать в расчёт электрических действий влияние промежуточной среды. Гельмгольц указал, что, по крайней мере в электрических взаимодействиях, влияние диэлектрика, выражающееся в его поляризации, учитывать совершенно необходимо.

Но действия в среде передаются с конечной скоростью. В связи с этим необходимо отметить, что уже до Максвелла и одновременно с Максвеллом были высказаны идеи (Гаусс, Б. Риман, К. Нейман), которые можно охарактеризовать как идеи запаздывающего дальнего действия. «В очень интересном письме Гаусса к Веберу (19 марта 1845; см. «Werke», т. V, стр. 629), — пишет Максвелл, — Гаусс ссылается на теоретические изыскания, которыми он удачно занимался и которые он хотел бы опубликовать, если бы мог твёрдо установить то, что он рассматривал как подлинный ключ электродинамики, а именно — выведение силы, действующей между движущимися электрическими частицами, рассматривая эту силу не в качестве мгновенного действия на расстояние, но действия, распространяющегося во времени таким же образом, как распространяется свет». Эту идею Гаусс не разработал, «но он был глубоко убеждён, что в первую очередь следовало бы составить надлежащее рациональное представление о том, каким образом это распространение происходит»².

В 1858 г. Риман представил Геттинггенскому обществу доклад, который он затем взял обратно и который был опубликован уже после его смерти в 1867 г. В этой работе указывается, что электродинамический потенциал удовлетворяет уравнению:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} + 4\pi\rho = \frac{1}{\alpha^2} \frac{\partial^2 V}{\partial t^2}$$

и таким образом зависит от времени по закону

$$V = \frac{\rho \left(t - \frac{r}{\alpha} \right)}{r},$$

где $\alpha^2 = \frac{1}{2} c^2$ — константа Вебера и равна скорости света в вакууме.

¹ Дж. К. Максвелл, Электричество в элементарном изложении, Киев, 1886, стр. 117—118.

² Дж. К. Максвелл, Избр. соч., стр. 628.

Работа Римана была опубликована с критическими замечаниями Клаузиуса, «который отметил неясность математических выкладок Римана и показал, что гипотеза распространяющегося подобно свету потенциала не приводит ни к формуле Вебера, ни к известным законам электродинамики» (Максвелл).

В 1868 г. вышло сочинение К. Неймана «Принципы электродинамики», в котором он отстаивает закон Вебера, но допускает, что электрическое действие распространяется с конечной скоростью.

Нейман различает электростатический, или э м и с с и о н н ы й, потенциал $\frac{ee'}{r}$ и электродинамический, или в о с п р и н и м а ю щ и й, потенциал $\frac{ee'}{r} \left[1 + \frac{1}{c^2} \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 \right]$. Это выражение выводится им из допущения, что эмиссионный потенциал распространяется с конечной скоростью, которая, как пишет Максвелл, «не является подобно скорости распространения света постоянной относительно эфира или пространства; эта скорость более похожа на скорость снаряда, являясь постоянной относительно скорости испускающей частицы в момент испускания».

«Отсюда вытекает,— резюмирует Максвелл,— что для того, чтобы понять теорию Неймана, мы должны составить себе представление о процессе передачи потенциала, весьма отличное от того представления, к которому мы привыкли, рассматривая распространение света. Можно ли будет это представление когда-либо принять в качестве «конструктивного представления» процесса передачи, который казался необходимым Гауссу, я сказать не могу, но я сам оказался не в состоянии составить себе рациональное представление о неймановской теории»¹.

Максвелл упоминает ещё о теории итальянского физика Бетти (1868), в которой ток рассматривается как совокупность периодических поляризующихся элементов. При этом действие поляризованных элементов друг на друга возникает не мгновенно, а через промежуток времени, пропорциональный расстоянию между элементами. Таким путём Бетти получил выражения для взаимодействия токов, совпадающие с уже известными.

Клаузиус критиковал математические расчёты Бетти. Максвелл же усматривал в умах авторов этих теорий «некоторое *предвзятъе* (курсив Максвелла) мнение или априорное возражение против гипотезы среды, в которой имеет место явление излучения света и тепла и электрических действий на расстояние». Он подчёркивал, что эти авторы согласны принять без объяснения «не только несомненный закон Ньютона притяжения на расстоянии, но и догму Котса, что действие на расстоянии является одним из первичных свойств материи и что никакое объяснение не может быть более понятным, чем этот факт»².

Однако Максвелл не упоминает о попытках построения эфирной теории электричества, повидимому они остались ему неизвестными. Речь идёт о теориях Эдлунда и Ганкеля.

Вихревая теория Ганкеля, опубликованная в 1865 и 1867 гг., была разработана в духе старых картезианских теорий. По Ганкелю, процесс заряжения тела заключается в возбуждении на его поверхности молекулярных вихрей: знак заряда тела определяется направлением вращения этих вихрей. Эти вихревые движения сообщаются частицам окружающего эфира, в котором возникают напряжения, приводящие в результате к при-

¹ Дж. К. Максвелл, Избр. соч., стр. 630.

² Там же, стр. 631.

тяжению и отталкиванию наэлектризованных тел. Изоляторы прозрачны для электрических колебаний, в проводниках же образуются стоячие вихри, чем и объясняется электризация влиянием.

Электрический ток — это общее вихревое движение эфира и молекул тела в поперечном сечении проводника, распространяющееся по его длине. Именно в связи с теориями типа теории Ганкеля Энгельс писал, что «вихри старого Декарта снова находят своё почётное место во всех новых областях знания».

В 1871 г. была опубликована работа Эдлунда под заглавием «О природе электричества». Эта теория представляет собой своеобразную модификацию унитарных теорий электричества. Важным пунктом теории Эдлунда является допущение конечной скорости распространения электрических действий, выведенных им из общего принципа природы, который он формулирует в следующих выражениях:

«Всё, что происходит в природе или совершается во внешнем мире, требует известного времени. Это время может быть сколь угодно малым, но никогда не может быть равно нулю. Время и пространство представляют необходимые условия бытия явлений природы»¹.

Этим глубоким философским положением обосновывается невозможность мгновенного, происходящего без затраты времени дальнего действия.

Далее Эдлунд отрицает существование двух особых деятелей электричества и все электрические явления объясняет с помощью гипотезы существования одной универсальной всепроникающей среды, которая вероятно является эфиром. Частицы эфира отталкиваются друг от друга, отталкивательные силы центральные, подчиняющиеся ньютоновскому закону расстояния.

В проводниках частицы электрического эфира могут легко перемещаться, в непроводниках они связаны с молекулами весомой материи. Отталкивательными силами эфирных частиц обусловлены его упругие свойства и возможность применения к нему процесса, аналогичного процессу Архимеда для жидкости. Тело, для которого всестороннее давление эфирных частиц не уравновешено, испытывает действие сил. Эдлунд называет тело положительно заряжённым, если оно содержит эфир в количестве, большем некоторого нормального количества, и отрицательным, если оно содержит эфира меньше нормального. Отсюда вытекает объяснение закона Кулона и электризации влиянием.

Электрический разряд — это перетекание эфира из одного тела в другое. Сила тока — произведение плотности эфира на скорость перемещения его частиц. Э. д. с. не создаёт эфира, а превращает колебательное тепловое движение его частиц в поступательное.

Так как электрические действия распространяются с конечной скоростью, то взаимодействие движущихся зарядов будет функцией их движения; оно будет зависеть как от скорости этого движения, так и от ускорения. Обработывая эту идею, Эдлунд приходит к выражению силы взаимодействия двух частиц m и m' , которое имеет вид

$$F = -\frac{mm'}{r^2} \left\{ 1 + \varphi \left(\frac{dr}{dt} \right) + \psi \left(\frac{d^2r}{dt^2} \right) \right\}.$$

Из этого выражения суммированием получается закон взаимодействия элементов тока. Так как форма этого закона известна, то это даёт возмож-

¹ Ф. Розенберг, История физики, т. III, ч. 2, стр. 388.

ность Эдлунду определить вид функций скорости φ и ψ . Теория Эдлунда подвергалась критике в особенности в её гипотезах о единой эфирной субстанции электричества и объяснении тока движением эфира.

Р о и т и в 1873 г. проделал опыт, аналогичный опыту Физо, пропуская световой луч вдоль направления тока и в противоположном направлении. Опыт дал отрицательный результат, что по мнению экспериментатора противоречило гипотезе эфирного тока. К. Нейман (1875, 1876) считал, что теория Эдлунда противоречит явлению униполярной индукции. К этому мнению присоединился В. Вебер (1876).

Эдлунд опровергал в ряде работ эти возражения, указывая, что и дуалистическая теория так же не в состоянии объяснить униполярную индукцию.

Трудности теоретического истолкования электрических явлений возрастали по мере накопления опытного материала, в особенности в области газового разряда и прохождения тока через электролиты. Энгельс характеризовал положение в современном ему учении об электричестве как «состояние разброда» и указывал, что только возникновение теории, аналогичной атомной теории в химии, обогащающей науку новыми открытиями, способно дать науке об электричестве необходимое средоточие и прочную основу для работы экспериментатора. Таким идейным «средоточием» и оказалась теория Максвелла, которая, в отличие от других теорий, еле справлявшихся с более или менее удовлетворительным описанием установленных фактов, не только описывала эти факты с единой точки зрения, но и вела к новым фундаментальным открытиям.

Однако была необходима длительная напряжённая работа физиков, чтобы укрепить эту теорию, подтвердить экспериментально её выводы и предпосылки. Только в результате такой работы было сломлено недоверие физиков к новой теории, и она заняла прочно своё место в науке в качестве единого стержня всей макроскопической электродинамики.

Развитие теории Максвелла до опытов Герца. Естественно возникает вопрос: какую роль играл сам творец теории в её развитии и укреплении? Максвелл жил после выхода «Трактата» шесть лет и за это время, несмотря на болезнь, продолжал интенсивно работать в науке. 25 сентября 1873 г. он на съезде Британской ассоциации в Бредсфорде произносит свою речь о молекулах, в которой заявляет себя убеждённым сторонником атомистической доктрины Демокрита, Эпикура и Лукреция. Действительно, Максвелл твёрдо держался концепции неизменных атомов и молекул и даже указывал, что естественную единицу длин надо искать не в макроскопическом мире, где она неизбежно будет подвергнута изменениям, а в атомно-молекулярном, где атомы и молекулы являются извечными кирпичами мироздания.

Максвелл проявляет большой интерес к атомистике, следит за работами Больцмана, за развитием учения о фазовых превращениях. Он был, пожалуй, единственным учёным в Европе, быстро оценившим важность термодинамических работ Гиббса. Сам он вскоре после опубликования исследования Ван-дер-Ваальса о непрерывности жидкого и газообразного состояния доказал из термодинамических соображений, что прямолинейная ветвь реальной изотермы рассекает завиток теоретической изотермы Ван-дер-Ваальса на симметричные части.

Таким образом, Максвелл продолжал развивать одно из существенных направлений своей научной деятельности — атомистическое. В Британской энциклопедии появляются его статьи, посвящённые учению об атоме и строению вещества. Что же касается работ по теории электричества, то

мы знаем, что он продолжал электрические исследования в Комиссии Британской ассоциации и последние годы работал над книгой «Электричество в элементарном изложении».

Из этой книги (незаконченной и опубликованной в незаконченном виде посмертно) мы узнаем, что Максвелл намеревался более последовательно и решительно, чем в «Трактате», провести фарадеевскую концепцию и что он внимательно следил за развитием его теории другими учёными, в частности за работами русских учёных П. А. Зилова и Н. Н. Шиллера.

В год смерти Максвелла появилась его статья в Британской энциклопедии об эфире, в которой он, в разделе об электромагнитной теории света, упоминает о появившейся в 1875 г. работе Г. А. Лоренца о теории отражения и преломления света, а также касается важного вопроса о поведении эфира в движущихся телах. Тому же вопросу было посвящено его последнее письмо редактору «Нейчур».

Таким образом, Максвелл, можно сказать, до последнего вздоха размышлял о развитии своей теории. Однако после «Трактата» он не прибавил никаких существенных результатов как экспериментального, так и теоретического характера к сделанному им в своих основоположных работах.

В связи с этим нужно отметить одно любопытное историческое обстоятельство. Не только сам Максвелл, но и его сотрудники в Кембридже не способствовали экспериментальному обоснованию теории. Подтверждению гипотезы о токе смещения и открытию электромагнитных волн физика обязана не английским учёным.

Почему это так? Может быть англичане не верили Максвеллу, не признавали его идей? Некоторая доля истины в этом есть. Как известно, такой ведущий английский физик, как Виллиам Томсон (лорд Кельвин), до конца своей жизни не признавал электромагнитной теории света и, в частности, максвелловского светового давления.

Но всё же английские физики в большинстве приняли теорию Максвелла. Как указывает А. Шустер, «первый систематический курс, основанный на максвелловской теории, был прочитан мною в Оуэн-Колледже в 1875/76 учебном году». Тот же Шустер даёт объяснение этому факту, и мы приведём это место из его книги «Прогресс физики» полностью:

«Можно выражать справедливое удивление, что хотя Максвелл и был окружён в Кэвендишской лаборатории большим числом молодых физиков, твёрдо веривших в его электромагнитную теорию, ими не было сделано никакой попытки дать экспериментальное доказательство теоретических выводов своего учителя. Объяснение этому находится в сильной степени в склонности Максвелла предоставлять идти своим ученикам собственной дорогой и находить самим свои задачи, разве только студент сам просил указать ему работу. Однако я сомневаюсь, чтобы ему часто случалось давать совет в выборе темы для исследования. Тем не менее, это мне лично известно, желательность экспериментальной проверки максвелловской теории сознавалась как кембриджскими учениками, так и другими английскими физиками, как например Фитцджеральдом, но экспериментальные трудности оказались ужасающими, особенно когда дело касалось получения электромагнитных волн, достаточно интенсивных, чтобы дать измеримый эффект на расстоянии. Существуй в то время две равно вероятных теории, я не сомневаюсь, что попытки произвести решающий опыт были бы сделаны; но мы были слишком уверены в правильности и простоте теории Максвелла. Обширные экспериментальные исследования, конечно, потребовали бы много времени и труда, мы не сочли бы их разумно затраченными, довольствуясь косвенными свидетельствами в пользу электромагнитной

теории, которые давал, казалось, результат предшествующих рассуждений. Мы были не правы: мы забывали, что огромное большинство учёных за границей, да, пожалуй, и в Англии, оставалось равнодушным и даже противилось мысли оставить сослуживший такую хорошую службу твёрдый упругий эфир и поставить на его место среду, свойства которой не были похожи ни на одно из известных тел. На стороне старых воззрений был даже сам лорд Кельвин со всем весом своего громадного авторитета¹.

Итак, Шустер считает, что «игра не стоила свеч», большие трудности эксперимента не окупаются, чтобы подтвердить столь ясную теорию, какой им представлялась теория Максвелла.

Но это не вполне так, и дело вовсе не в равнодушии и противодействии заграничных учёных и Кельвина. Вероятно, новизна теории не была осознана и самими учениками Максвелла. Ведь то, что существует электромагнитное поле, отделившееся от тела излучателя, обладающее энергией и импульсом, поле, отличное от полей, обуславливающих наблюдаемые в обычных условиях электрические, магнитные и индукционные действия, вряд ли было ясно и самому Максвеллу. И никаких особых экспериментальных трудностей для обнаружения этого поля — если знать о его существовании — нет. В этом случае расчётливость и осторожность английских учёных оказали им плохую услугу.

Но была и другая более глубокая причина. Английские учёные считали, что наиболее важным моментом фарадеевско-максвелловской концепции является влияние среды на физические процессы, точнее говоря — роль среды во всех взаимодействиях тел. Изучение этого влияния, как справедливо полагали и Фарадей и Максвелл, должно пролить свет не только на природу электричества, но и на теорию строения вещества. Поэтому кембриджские физики сосредоточили своё внимание на вопросах прохождения электричества через газы, рассчитывая получить в этом направлении важные и существенные результаты для теории. Этот расчёт оказался правильным и привёл к расширению как теории электричества, так и теории строения вещества. Об этих результатах мы будем говорить в своём месте.

Всё же отметим здесь ещё удивительное «невезение» англичан. Хотя они начали планомерное и систематическое изучение газового разряда, но наиболее ошеломляющие открытия, связанные с этими исследованиями, были сделаны не ими. Рентгеновские лучи открыл Рентген в Германии, а радиоактивность — Беккерель во Франции. И в дальнейшем, хотя первая ядерная реакция была осуществлена в Кембридже Резерфордом, инициатива в вопросе об освобождении атомной энергии была перехвачена у англичан.

Сказанное выше, однако, не означает, что английские физики не сыграли своей роли в развитии теории Максвелла. Их вклад в развитие теории оказался существенным. Работы Дж. Дж. Томсона, О. Хевисайда, Д. Пойнтинга, Г. Фитцджеральда, о которых будет речь в дальнейшем, в сильной степени способствовали развитию и укреплению теории электромагнитного поля.

В 1870 г. Гельмгольц (1821—1894) развил теорию электродинамических процессов в покоящихся проводящих телах. Здесь он написал уравнения в духе теории дальнего действующего потенциала, но с учётом роли среды. Полный ток в этой теории складывается из тока проводимости и поляризационного тока, плотность которого равна скорости изменения вектора поляризации.

Из теории Гельмгольца вытекало существование в диэлектрике поперечных электрических колебаний, распространяющихся с некоторой скоростью, и продольных, распространяющихся с другой скоростью.

Вместе с тем Гельмгольц сделал в своей работе очень важное примечание о поведении величин, характеризующих электромагнитные процессы на границе раздела двух сред, а именно: нормальные компоненты векторов электрической и магнитной индукции при переходе через границу остаются непрерывными, так же непрерывными остаются тангенциальные компоненты векторов напряжённости электрического и магнитного полей. Это, как указал Гельмгольц, даёт возможность найти отражённую и преломлённую волну. Если предположить, что оптическая разность сред представляется разностью их диэлектрических постоянных, то направление электрического вектора должно быть перпендикулярным плоскости поляризации.

Положив в основу уравнения Гельмгольца, Г. А. Лоренц (1853—1928) в 1875 г. вывел формулы Френеля для отражения и преломления и тем самым существенно расширил электромагнитную теорию света. Вывод пограничных условий из уравнений Максвелла был дан уже Герцем.

С другой стороны расширение теории Максвелла, уже не укладывающееся в рамки этой теории, было достигнуто открытием нелинейного характера зависимости намагничивания от напряжённости поля.

«Самый факт намагничения, — говорил Столетов во вступительной речи на защите своей магистерской диссертации, — приобрёл великое значение в физике со времени открытий Фарадея, утвердивших всеобщность процесса намагничения — восприимчивость всех тел природы в большей или меньшей степени к действию магнитных сил»¹.

Таким образом, тема исследования Столетова теснейшим образом связана с фарадеевско-максвелловским направлением в теории электромагнетизма и явилась одной из первых работ в обширном ряде последующих исследований влияния среды на электрические и магнитные процессы.

Но установленные Столетовым факты не укладывались в рамки линейной теории, ферромагнетизм занял особое место в электродинамике.

Уже Кирхгоф вынужден был ввести для описания процессов в ферромагнетиках вместо постоянного коэффициента намагничения некоторую эмпирическую функцию напряжённости поля, зависящую от формы тела. Столетов же поставил своей задачей исследовать свойства вещества, так чтобы влияние формы тела было исключено. Поэтому он отказался от прежних методов исследования образцов определённой формы (эллипсоида, шара, цилиндра), а воспользовался методом кольца (тора), предложенного также Кирхгофом.



А. Г. Столетов

¹ А. Г. Столетов, Собр. соч., т. I, Гостехиздат, 1948, стр. 78.

Но для того, чтобы реализовать эту идею, Столетову пришлось покинуть обычный путь исследования магнитных свойств с помощью магнитометра и разрабатывать новую методику исследований магнитных свойств вещества. Разработанный им метод стал классическим и под названием баллистического метода прочно вошёл в современную научную и техническую практику магнитных измерений. Истоки этого метода, как указывает сам Столетов, восходят ещё к Ленцу.

Выполненное им в 1871 г. исследование составило предмет его магистерской диссертации. При защите Столетов указывал на важное научное и практическое значение его работы: «С одной стороны, изучение его (вопроса о функции намагничения.— П. К.) может уяснить нам механику того частичного¹ процесса, который составляет сущность магнитного состояния тел. . . С другой стороны, целый ряд новых магнитоэлектрических машин, в которых малым запасом постоянного магнетизма и тратой работы достигаются огромные электрические эффекты, существенно основан на факте временного намагничения железа и прямо наводит нас на более обстоятельное изучение этого факта»².

Столетов оказался глубоко прав. В конце своей работы он ещё раз подчёркивает её важность для электротехники: «Значение свойств железа относительно временного намагничения так же необходимо здесь (в теории электромагнитных машин.— П. К.), как необходимо знакомство со свойствами пара для теории паровых машин»³.

Для своего исследования Столетов, как было сказано, применил идею, предложенную Кирхгофом в 1870 г. Использованное в его эксперименте железное кольцо было изготовлено из железа, подвергавшегося в течение 12 часов прокаливанию для уничтожения остаточного магнетизма. Кольцо было прямоугольного сечения шириной 9,828 мм и высотой 14,75 мм; внешний диаметр его составлял 200,025 мм, внутренний 180,37 мм, так что радиус осевого круга составлял 95,098 мм. Число оборотов внутренней обмотки было 800, внешней 750. Измерения производились с помощью магнитометра, состоящего из фунтового магнита, подвешенного к потолку на длинной и тонкой проволоке. Магнит был окружён овальной обмоткой мультипликатора. Отсчёт производился методом зеркала и трубы.

Описанный магнитометр служил Столетову как для измерения намагничивающего тока, так и для индуцированного количества электричества. Измерение намагничивающего тока производилось двумя методами. Первый метод — метод вспомогательной катушки («бобины»). Эта катушка состояла из четырёх слоёв обмотки с числом витков в каждом слое 37, за исключением четвертого, в котором 36 оборотов. Толщина (длина) катушки 66 мм, радиусы оборотов (последовательно) 112, 113,8, 115,6, 117,4 мм. По этим данным Столетов рассчитывает сумму всех площадей витков, которая определяет магнитный момент катушки. Она оказывается равной 6 075 500 кв. мм. Катушка располагается на расстоянии 1000—1250 мм от магнита магнитометра так, чтобы её ось была перпендикулярна к магнитному меридиану. При прохождении тока в ней она действует как магнит, отклоняющий магнит магнитометра из плоскости магнитного меридиана. Угол отклонения определяется соотношением

$$\operatorname{tg} u = \frac{2Fi}{R^3H}.$$

¹ То есть «молекулярного». — П. К.

² А. Г. Столетов, Собр. соч., т. I, стр. 80.

³ Там же, стр. 150.

Здесь F — суммарная площадь витков катушки, i — сила тока в ней, H — горизонтальная составляющая магнитного поля земли. Отсюда можно определить постоянную C в соотношении $i = CH \operatorname{tg} \alpha$.

Схема расположения приборов при измерениях по этому методу показана на рисунке 87: здесь K — источник тока, C_1 и C_2 — коммутаторы, P — кольцо, M — магнитометр, обмотка мультимпликатора которого соединена со вторичной обмоткой S кольца, R — бобина, W — магазин сопротивлений.

Другой метод (при слабых намагничивающих токах) состоит в том, что часть намагничивающего тока с помощью мостика ответвляется в обмотку мультимпликатора. В результате своих опытов Столетов установил неприменимость для железа гипотезы Пуассона о пропорциональности намагничивания напряжённости поля. Он установил, что «при малых намагничивающих силах функция намагничивания железа имеет возрастающее течение и при некоторой цифре силы достигает наибольшей величины»¹.

Мы уже указывали, что А. Г. Столетов обратил внимание физиков на важность измерения отношения электромагнитных и электростатических единиц. Он предложил свой метод измерения этого соотношения, сообщенное о котором он сделал 23 сентября 1881 г. во Французском физическом обществе. Это так называемый метод абсолютного конденсатора, т. е. конденсатора, ёмкость которого может быть точно вычислена по его форме и размерам. Схема установки Столетов по определению отношения единиц изображена на рисунке 88.

Для теории Максвелла важно было проверить фундаментальное соотношение $n^2 = \epsilon$. Первым, кто предпринял измерение диэлектрических постоянных с целью проверки соотношения Максвелла, был Л ю д в и г Б о л ь ц м а н. Его измерения диэлектрических постоянных относятся к 1872—1874 гг. Для своих измерений он пользовался квадратным электрометром, ёмкость которого предварительно определялась. Для измерения диэлектрической постоянной твёрдых тел между пластинами плоского конденсатора помещалась пластинка испытуемого вещества толщиной δ . В этом случае ёмкость конденсатора могла быть вычислена по формуле

$$C = \frac{S}{4\pi \left(d - \delta + \frac{\delta}{\epsilon} \right)},$$

где S — площадь обкладок конденсатора, d — расстояние между ними, ϵ — искомая диэлектрическая постоянная. В опытах Больцмана одна из

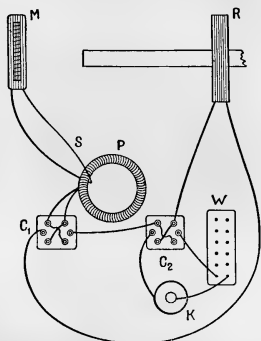


Рис. 87. Схема опыта Столетов по определению функции намагничивания: C_1 и C_2 — коммутаторы; P — кольцо с обмоткой; R — круглая бобина; M — магнитометр; S — вторичная обмотка; W — магазин сопротивлений

¹ А. Г. Столетов, Собр. соч., т. I, стр. 80.

обкладок конденсатора заряжалась от батареи из элементов Даниэля другая заземлялась. Измерялась электрометром ёмкость C_0 в отсутствии диэлектрика, а затем при наличии диэлектрика C . Затем одна из пластин перемещалась до расстояния между обеими обкладками d_1 и вновь измерялись ёмкости C_0 и C' . Диэлектрическая постоянная вычислялась по формуле:

$$\epsilon = \frac{\delta}{\frac{\lambda_4 - \lambda_3}{\lambda_2 - \lambda_1} (d_1 - d) + \delta},$$

где $\lambda_1 = \frac{1}{C_0}$, $\lambda_2 = \frac{1}{C'_0}$, $\lambda_3 = \frac{1}{C}$, $\lambda_4 = \frac{1}{C'}$.

Второй метод Больцмана заключался в следующем. К заряжённому телу подносился шарик из испытуемого диэлектрика, и с помощью крутиль-

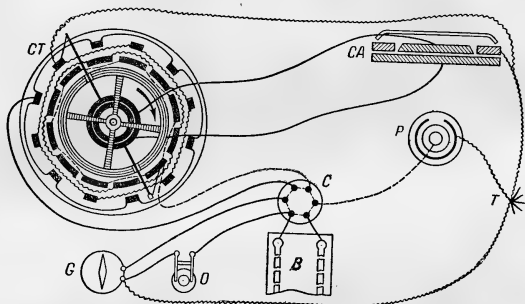


Рис. 88. Схема опыта Столетова по определению отношения электромагнитных и электростатических единиц

СА — конденсатор; Р — батарея; СТ — вращающийся коммутатор; G — остаточный гальванометр В. Томсона; В — магазин сопротивлений; О — шунт; Т — соединение с землёй; С — коммутатор

ных весов измерялась действующая на него сила f . Затем измерялась сила f_0 , действующая на такой же шарик, обёрнутый станиолем. Теория показывает, что $f - f_0 = \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2}$. Этим путём Больцман нашёл, что сера имеет для трёх главных осей упругости значения диэлектрических постоянных $\epsilon_1 = 4,773$; $\epsilon_2 = 3,970$; $\epsilon_3 = 3,811$. Оптические данные приводят к значениям: $n_1^2 = \epsilon_1 = 4,596$; $n_2^2 = \epsilon_2 = 3,886$; $n_3^2 = \epsilon_3 = 3,591$.

Для твёрдых изотропных диэлектриков Больцман получил следующие результаты:

	ϵ	$\sqrt{\epsilon}$	n
Расплавленная сера	3,84	1,960	2,040
Канифоль	2,55	1,597	1,543
Парафин	2,32	1,523	1,556
Эбонит	3,15	1,775	—

Далее Больцман произвёл измерения диэлектрической постоянной в газах. С этой целью под колокол воздушного насоса помещались две, хорошо изолированные, параллельные металлические пластинки A и B на неизменном расстоянии друг от друга. Пластина B соединялась с полюсом батареи, пластинка A с одной из пар квадрантов электрометра; другая пара квадрантов электрометра, равно как и другой полюс батареи, заземлены. Если пластинка A на короткое время с присоединённой к ней парой квадрантов заземляется, то стрелка покажет потенциал пластинки B , равный V_1 , при потенциале A , равном 0. Если заменить под колоколом один газ другим, то потенциал A при постоянном потенциале B будет уже не 0, а ΔV_A . Можно показать, что

$$\Delta V_A = V_1 \left(1 - \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}\right), \text{ где } \epsilon_1 \text{ — диэлектри-$$

ческая постоянная первого газа, когда потенциал пластины A был равен нулю, ϵ_2 — диэлектрическая постоянная второго газа. Больцман получил таким путём следующие результаты¹ (при 0° и атмосферном давлении):



Н. Н. Шиллер

	ϵ	$\sqrt{\epsilon}$	n
Воздух	1,000590	1,000295	1,000294
Углекислота	1,000946	1,000473	1,000449
Водород	1,000264	1,000132	1,000138
Оксись углерода	1,000690	1,000345	1,000340
Закись азота	1,000994	1,000497	1,000503
Этилен	1,001312	1,000656	1,000678
Болотный газ	1,000944	1,000472	1,000443

Далее измерениями диэлектрических постоянных и проверкой закона Максвелла занялись русские физики — ученики Столетова. Известно, что ещё в 60-х годах Столетов и Рачинский занимались экспериментами по исследованию влияния диэлектрической среды на электромагнитные процессы. В 70-х годах этот вопрос занимает центральное место в работах его учеников.

В 1874 г. Н. Н. Ш и л л е р впервые в мире стал измерять диэлектрическую постоянную в переменных полях. Это имело особо важное значение для теории Максвелла; как мы видели в предыдущей главе, Максвелл указывал на необходимость сравнивать показатели преломления и диэлектрические постоянные в одинаково меняющихся полях. В одной из своих последних работ он вновь повторил: «Мы едва ли можем надеяться даже на приблизительную проверку, если будем сравнивать результаты наших медленно протекающих электрических опытов со световыми колебаниями, совершающимися биллионы раз в секунду».

Поэтому измерения Шиллера имели принципиальное значение, как первый шаг в построении электрической спектроскопии. Шиллер измерял периоды колебаний в разомкнутой вторичной цепи индукционной катушки

¹ Дж. К. Максвелл, Электричество в элементарном изложении, стр. 132.

в трёх случаях: 1) концы вторичной обмотки катушки изолированы, 2) концы соединены с обкладками воздушного конденсатора, 3) концы соединены с обкладками конденсатора, изолирующий слой которого образован испытуемым диэлектриком. Если обозначать периоды колебаний в этих трёх случаях соответственно T_1 , T_2 , T_3 , то искомая диэлектрическая постоянная определится уравнением

$$\epsilon = \frac{T_2^2 - T_1^2}{T_3^2 - T_1^2}.$$

Период колебаний в этих опытах менялся от 6 до 8 сотых тысяч секунд.

В другом способе конденсатор заряжался 20—25 раз в секунду от батареи и разряжался через гальванометр; при этом конденсатор имеет в качестве изолятора либо воздух, либо испытуемый диэлектрик. Результаты измерений Шиллера даны в следующей таблице:

	1-й способ	2-й способ	n^2
Эбонит	2,21	2,76	
Чистый каучук	2,12	2,34	2,25
Вулканизированный каучук	2,69	2,94	
Парафин быстро охлаждённый, светлый .	1,68		
» медленно охлаждённый, молочн- нобелый	1,81	1,92	2,19
Парафин охлаждённый другой, образчик .	1,89	2,47	2,34
Стекло цвета соломы	2,96	4,12	
» » »	3,66		
Белое зеркальное стекло	5,83	6,34	

В следующем 1875 г. были опубликованы измерения П. А. З и л о в ы м диэлектрических постоянных жидкостей. Для терпентинового масла он нашёл

$$\epsilon = 2,21, \quad \sqrt{\epsilon} = 1,49, \quad n_{\infty} = 1,456.$$

Зилов продолжил свои исследования в 1876 г. и обобщил их в своей магистерской диссертации «Опытное исследование диэлектрической поляризации в жидкостях». Ярко выраженный «максвелловский» характер работы виден уже из предисловия, в котором автор важнейшим итогом работы считает доказательство того, что «во взаимодействии электрических масс окружающая среда принимает участие». Далее он пишет:

«Определив диэлектрические постоянные некоторых жидкостей, я естественно перешёл к проверке закона Максвелла, по которому диэлектрическая постоянная равна квадрату его показателя преломления для n и n — менее преломлённых лучей»¹ (разрядка моя. — П. К.).

Теоретическая часть работы посвящена изложению электромагнитной теории света. В первом варианте работы Зилов, строго следуя Максвеллу, получает для компонент электрического и магнитного поля волновое уравнение вида

$$\Delta F = \frac{\epsilon}{v^2} \frac{\partial^2 F}{\partial t^2}.$$

«Эти уравнения, — пишет Зилов, — тождественны с теми, которые вводятся в теорию упругости для распространения перемещений в твёрдом упругом теле; ими же выражается распространение световых колебаний в эфире.

¹ П. А. З и л о в, Опытное определение диэлектрической поляризации в жидкостях, М., 1877, стр. 23.

Отсюда следует, что действие электромагнитных сил распространяется совершенно так же, как световые колебания распространяются в прозрачной среде. Что касается длины электрических волн, то надо думать, что она бесконечно велика сравнительно с длиной световых волн».

Как видим, идеи электромагнитной теории света изложены Зильовым с предельной ясностью. Столь же ясно он формулирует и основные следствия теории.

Первое: «Электромагнитная единица электрической массы относится к электростатической единице как скорость распространения света в воздухе».

Второе: «Квадратный корень из диэлектрической постоянной изолятора равняется его показателю преломления для лучей бесконечно длинной волны».

Очень точно и хорошо выражается здесь Зильов. Однако идея тока смещения в эфире казалась настолько необычной, что Столетов рекомендовал Зильову переработать теоретическую часть в духе теории Гельмгольца. У Гельмгольца тока смещения в эфире нет, есть только поляризационный ток,



П. А. Зильов

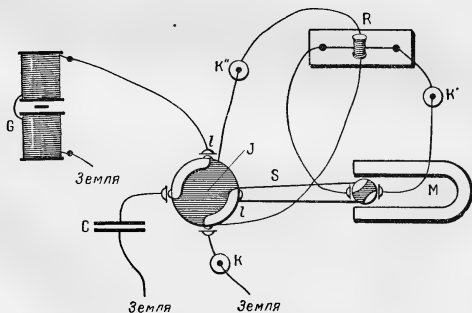


Рис. 89. Метод Зильова

и закон Максвелла получается как приближение, если считать что диэлектрические восприимчивости эфира и вещества много больше единицы. В этом духе Зильов и переработал свою теоретическую главу. Отметим, что теория Гельмгольца ещё долго конкурировала с максвелловской, в частности Гольдгаммер писал свою «Электромагнитную теорию света» на её основе. После теоретической части в диссертации Зильова идёт очень инте-

ресный обзор экспериментальных работ, имеющих целью проверки основных положений теории. Понятие «поляризации» вещества, как указывает Зилов, ведёт свое происхождение от Авогадро. Зилов цитирует из статьи Авогадро, опубликованной в 1866 г.: «Сплошную пластину (изолятора) можно представить себе разделённой на столько слоёв, сколько частиц в её толщине; когда пластинка заряжается, то каждый слой нужно рассматривать как получающий свой частный заряд, так что сторона, имеющая какой-нибудь заряд, соприкасается со стороной другой пластины, имеющей электричество другого рода. Кулон и Гаусс пришли к подобному же результату в своих исследованиях о магнетизме».

После описания ранних экспериментов по определению диэлектрической постоянной Зилов излагает измерения Больцмана. За ними он оста-

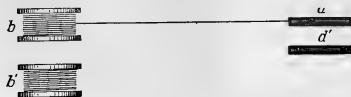


Рис. 90. К методу Максвелла

навливается на экспериментальной проверке другого следствия теории $V = c$. Здесь Зилов после характеристики экспериментов Вебера и Кольрауша описывает метод самого Максвелла (1868). На одном конце рычага крутильных

весов укреплён диск d , на другом катушка b (рис. 90). Перед диском d помещается параллельно ему на расстоянии r неподвижный диск d' , а перед катушкой такая же неподвижная катушка b' . Диски соединяются с полюсами батареей, а через катушки пропускается ток так, чтобы они притягивались. Расстояние подбирается так, чтобы силы электростатического и электромагнитного притяжения уравновешивались. Максвелл нашёл

$$V = 28\,800 \cdot 10^7 \frac{\text{мм}}{\text{сек}}.$$

Зилов сообщает и о более поздних измерениях 1869 и 1873 гг. других авторов. Все эти эксперименты указывают на близкое равенство скорости света и электромагнитной константы. Это, по мнению Зилова, «не оставляет ни малейшего сомнения в верности мысли, которая лежит в основании электромагнитной теории света».

Далее Зилов «берёт быка за рога» и переходит к центральному пункту теории — магнитному действию тока смещения. Он пишет:

«Возникновение или вообще изменение поляризации равносильно току в проводнике; прямых наблюдений над этим состоянием диэлектрика до сих пор не было сделано, тем не менее опыты Шиллера дают косвенное указание на то, что диэлектрики в момент развития в них поляризации обладают электромагнитными свойствами». Опыты Шиллера, о которых идёт здесь речь, описаны в диссертации последнего: «Электромагнитные свойства концов разомкнутых токов в диэлектрике» (1876).

Гельмгольц, производя анализ электродинамических теорий, основанных на дальном действии и оперирующих при математическом описании с некоторой потенциальной функцией, показал, что, хотя результаты этих теорий и совпадают для замкнутых токов, для разомкнутых токов выводы этих теорий должны быть отличными от вывода максвелловской теории, допускающей ток в диэлектрике (и его собственной). Для проверки этого вывода Шиллер измерял действие острия, соединённого с полюсом электростатической машины на намагниченное стальное кольцо. Замкнутый ток не действует на такое кольцо, тогда как разомкнутый ток по теории дального

действия должен оказывать действие (по расчётам Шиллера могущее быть обнаруженным экспериментально), по теории Максвелла не должен (в максвелловской теории незамкнутых токов нет). Никакого действия не было обнаружено: «Остаётся,— писал Шиллер,— или принять выводы теории, не признающей электродинамических действий разомкнутых концов, или отказаться от мысли о возможности самого существования таких концов»¹.

Этот вывод Шиллер проверил ещё и на другом эксперименте, в котором наблюдалось действие электромагнита на заряжённый конденсатор, вращающийся между его полюсами (рис. 91). По закону Ампера, электромагнит должен был бы действовать на разомкнутые концы (обкладки конденсатора). Действие не наблюдалось. «Стало быть, остаётся допустить, что в электродинамическом отношении нет концов тока и диэлектрики действуют как проводники»².

Следовательно, опыты Шиллера были первым экспериментальным доказательством (правда, не прямым, а косвенным) существования токов смещения, доказательством справедливости максвелловского принципа замкнутости тока. Зиллов, разбирая вопрос об электродинамическом действии диэлектрика, предлагает такой вариант опыта: на окружности металлического диска помещены стеклянные (или из другого диэлектрика) выступы сектора, отделённые друг от друга промежутками. К внешним дугам этих секторов прилегают металлические пластинки. Металлический диск заземляется, а металлические дуговые пластинки соединяются скользящим контактом с полюсом батареи. Над одним из выступов помещена магнитная стрелка. При быстром вращении диска с секторами возникнут кратковременные поляризационные токи, действие которых на стрелку суммируется. Этот вариант не был осуществлён и магнитное действие поляризационного тока было обнаружено впоследствии А. А. Эйхенвальдом несколько иным способом.

Однако поляризация, как указывает Зиллов, приводит к возникновению механических сил в диэлектрике, и «можно думать, что эти силы достаточны для такого изменения молекулярного строения диэлектрика, которое легко обнаружить оптическим путём». В качестве подтверждающего примера Зиллов приводит открытый Керром в 1875 г. эффект двойного преломления света в наэлектризованном диэлектрике.

Ещё Ломоносов задумывал опыт, которым можно было бы установить влияние электризации тела на преломление света в нём. Теперь эта идея была осуществлена. В опыте Керра кусок зеркального стекла пробуравливался с двух сторон, так что образовались два канала, параллельные граням стекла. Между концами этих каналов оставалась непробуравлен-

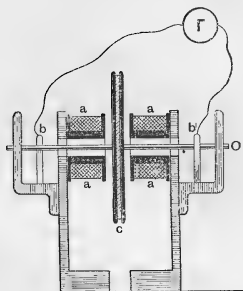


Рис. 91. Опыт Шиллера по обнаружению существования токов смещения

c — вращающийся конденсатор, *a* — катушки электромагнита, *г* — гальванометр, *b* — скользящие контакты.

¹ Цит. по В. М. Дукову, Развитие теории электромагнитного поля до опытов Герца, журн. У.Ф.Н., т. XLIX, вып. 4, 1953, стр. 582.

² Там же, стр. 584.

ная часть толщиной около 6 мм. В каналы закладывались электроды с закруглёнными концами (см. рис. 92а), к которым подводилось напряжение от катушки Румкорфа. Пластинка была помещена между двумя николями, скрещёнными на темноту, причём первый николю устанавливался так, чтобы его плоскость поляризации составляла угол 45° с направлением электродов. При включении напряжения поле просветлялось и вращением второго николя нельзя было добиться темноты. Только если между стеклом и николем помещалась тонкая стеклянная пластинка, растянутая по направле-

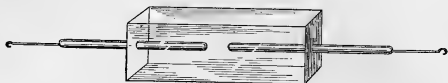


Рис. 92а. К эффекту Керра

нию электрических силовых линий, можно было добиться вновь темноты. Это означает, что под действием электрического поля стекло становилось двоякопреломляющим, подобным стеклу, сжатою параллельно силовым линиям.

Керр показал далее, что аналогичное явление наблюдается в сероуглероде. В 1879 г. он подверг исследованию целый ряд жидкостей. В 1880 г.

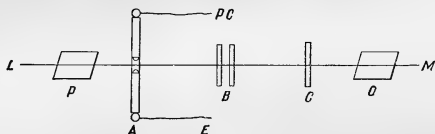


Рис. 92б. Схема установки Керра

он установил закон, согласно которому разность ходов лучей, поляризованных параллельно и перпендикулярно силовым линиям, рассчитанная на единицу длины, пропорциональна квадрату напряжённости поля:

$$\delta = k \sqrt{\left(\frac{V_1 - V_2}{d} \right)}.$$

Зилов в своём исследовании формулирует сущность открытия Керра словами: «диэлектризация прозрачного изолятора действует на проходящий через него пучок поляризованного света, подобно тому, как действует на него сжатие стекла, через которое он проходит». Следует, однако, отметить, что в 1876 г. существование эффекта Керра ещё оспаривалось. Ряд исследователей, повторяя опыт Керра, не получили его результата.

Наконец, Зилов переходит к описанию своих экспериментов. Первый метод определения диэлектрической постоянной жидкости заключался в определении ёмкости конденсатора с диэлектриком и без него. Ёмкость измерялась с помощью гальванометра: конденсатор то заряжался от батарей, то разряжался через гальванометр с помощью коммутатора специальной конструкции. По второму методу измерялся заряд с помощью электро-

метра, специально сконструированного Зильовым. Четыре полоски станиоля, вырезанные по особой форме, наклеивались на бока и дно цилиндрического сосуда, образуя четыре квадранта, между которыми подвешивалась на серебряной проволочке стрелка из двух платиновых цилиндрических пластинок, коаксиальных сосуду, припаянных к платиновому стерженьку (рис. 93). В сосуд наливалась жидкость. При одинаковых потенциалах отклонение стрелки в сосуде с жидкостью в ϵ раз больше, чем в воздухе. Данные, полученные Зильовым, таковы:

	1-й метод	2-й метод	n^2
Терпентин 1	1,468	1,473	1,458
» 2	—	1,507	1,453
Петроль 1	1,439	—	1,422
» 2	—	1,428	1,435
Бензол	1,483		1,486

Результаты Больцмана, Шиллера и Зильова привёл Максвелл в своей книге «Электричество в элементарном измерении», вышедшей в незакончен-

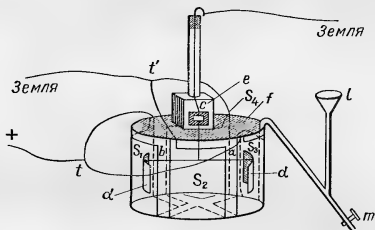


Рис. 93. Метод Зильова для определения диэлектрических проницаемостей жидкостей

ном виде уже после его смерти. В материал этой книги вошли некоторые лекции по электричеству, читанные им в Кембридже. Издатели дополнили отрывки рукописи Максвелла параграфами из «Трактата». Сохранился отрывок предисловия Максвелла, в котором он пишет, что в этой книге он «старался изложить в возможно сжатой форме явления, которые, по-видимому, наиболее ярко освещают теорию электричества», и указывает, что, в отличие от «Трактата», где он наряду с методом Фарадея пользовался и методами математиков, здесь он сохраняет только фарадеевский метод. «После того (т. е. после выхода «Трактата») я убедился в превосходстве методов, подобных методам Фарадея, и принял их вследствие этого уже с самого начала» (курсив мой.— П. К.).¹

Можно не сомневаться, что в этом убеждении Максвелла сыграли свою роль эксперименты Шиллера и Зильова. Показательно, что эта книга Максвелла вышла в 1886 г. в русском переводе под редакцией М. П. А в е н а - р и у с а. Это был первый русский перевод трудов по электричеству Максвелла, и самый факт его появления был доказательством глубокого внимания русской науки к новой теории.

¹ Дж. К. Максвелл, Электричество в элементарном изложении, стр. VII.

В своей книге Максвелл большую часть раздела о диэлектриках посвящает рассмотрению электрического разряда в диэлектриках. Этот разряд, в полном соответствии со своей концепцией о поляризации как некоторой деформации в диэлектрике, Максвелл рассматривает как аналогию «разрыву твёрдого тела, подвергающегося постоянно возрастающему натяжению».

«Аналогия эта,— указывает Максвелл,— настолько совершенна, что описывая состояние среды под действием электровозбудительной силы, мы можем пользоваться выражениями, которые мы применяем к телам, подвергаемым действию натяжения. Так, электровозбудительная сила и электрическое перемещение соответствуют обыкновенной силе и обыкновенному перемещению. Электровозбудительная сила, производящая мгновенный разряд, соответствует натяжению, разрывающему тело. . . абсолютная крепость проволоки соответствует наибольшей электровозбудительной силе, какую может выдержать диэлектрик. Мы можем назвать её электрической крепостью диэлектрика»¹.

Говоря специально о разрядах в газах, Максвелл указывает, что «теория электрического свойства газов находится ещё в очень несовершенном состоянии». Исходя из кинетической теории газов, следовало бы ожидать, что «проведение электричества через газы должно быть подобно конвекции». Но это, по мнению Максвелла, не согласуется с фактом отсутствия проводимости воздуха при обычных температурах и небольших электродвижущих силах. Наэлектризованное тело, поставленное на совершенно непроводящую подставку, никогда не потеряло бы свой заряд через воздух.

Ученики Максвелла, как свидетельствует Шустер, долгое время упорствовали в отрицании «молекулы электричества», но именно изучение разряда в газах и привело к торжеству этой, брошенной Максвеллом, идеи и к открытию электрона. Об этом будет идти речь в следующей главе.

Обращаясь к вопросу о соотношении Максвелла $\epsilon = n^2$, мы должны здесь остановиться на вопросе о дисперсии. Диэлектрическая «постоянная», как показывает её название, предполагается независимой от свойств поля, в то время как показатель преломления, как известно со времён Ньютона, зависит от частоты световых колебаний. Эта зависимость усложнилась открытием в 1862 г. Л е - Р у аномальной дисперсии в парах йода, и в 1870—1871 гг. аномальной дисперсии в растворе фуксина (Х р и с т и а н - с е н). В 1871 г. Август К у н д т (1839—1894) опытами со скрещёнными призмами показал, что аномальная дисперсия не является исключением, а является общим явлением, сопровождающим прохождение света через все окрашенные среды, и таким образом тесно связана с избирательным поглощением света веществом.

Самая ранняя теория аномальной дисперсии принадлежит Максвеллу (1869), но она не была электромагнитной. Максвелл полагает, что прозрачная среда, в которой распространяется световой луч с частотой колебаний n , имеет зернистую структуру; в неё вкраплены атомы, могущие совершать собственные упругие колебания с частотой p . Уравнения движения эфира и атомных частиц могут быть получены средствами механики из выражений энергии упруго деформированного эфира и колеблющейся частицы. Они имеют вид:

$$\rho \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} + \sigma \left(\frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} \right) - E \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} = 0.$$

¹ Дж. К. Максвелл, Электричество в элементарном изложении, стр. 133.

$$\sigma \left(\frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} \right) + \sigma p^2 \zeta = 0.$$

Здесь ρ — плотность эфира, σ — масса атомной частицы, E — модуль упругости эфира, η — смещение эфира, $\eta + \zeta$ — смещение атомной частицы. Если в среде распространяется волна со скоростью v и с частотой n , то подстановка даёт

$$\frac{1}{v^2} = \frac{\rho}{E} + \frac{\sigma p^2}{E(p^2 - n^2)},$$

и так как $\frac{\rho}{E} = \frac{1}{c^2}$, где c — скорость света в эфире, а $\frac{c}{v} = \mu$ — показателю преломления, то отсюда

$$\mu^2 = 1 + \frac{\sigma p^2}{\rho(p^2 - n^2)}.$$

В 1871—1872 гг. появилась работа Зельмейера «О возбуждении колебаний эфира вещественных частиц, способных к колебаниям, и их обратном воздействии на колебания в эфире, объясняющем, в частности, дисперсию и её аномалии». В этом большом заглавии раскрывается идея работы. Эфирная среда содержит частицы, способные совершать колебания под действием внутренних упругих сил. Под действием световой волны с частотой ω частицы совершают вынужденные колебания с этой частотой и если волна в отсутствие частиц распространялась со скоростью v , то в среде, имеющей частицы, способные колебаться с частотой n , скорость распространения будет v и определяется уравнением

$$\frac{1}{v^2} = \frac{1}{V^2} \left(1 + \frac{\beta n^2}{n^2 - \omega^2} \right)$$

(β — постоянная, характеризующая свойства частиц среды). Это и есть уравнение Зельмейера, описывающее аномальную и нормальную дисперсию. Так как в области собственных частот эта формула приводит к бесконечному значению показателя преломления, то О. Е. Мейер развил теорию, введя представление о силах трения. Теорию развивали также Кеттелер (1874) и Гельмгольц (1875), введший в теорию затухание и обобщивший её на случай нескольких резонансных частот. Попытку изложить теорию дисперсии на электромагнитной основе предпринял Колачек (1887), затем Друде (1892) и Гельмгольц (1892 — 1893). В том же 1892 г. электронную теорию дисперсии дал Лоренц.

Следовательно, исследования в области изучения электрических свойств вещества и проверки соотношения Максвелла подтвердили основное положение теории о важной роли среды в электрических и магнитных взаимодействиях, однако вместе с тем привели к выводу о необходимости расширения теории, внесения в неё атомных представлений.

Развития и углубления требовала и сама идея поля. Максвелл строил свои уравнения на основе динамической аналогии, рассматривая систему стационарных и квазистационарных токов как механическую систему с конечным числом степеней свободы. Здесь поле выступает как вспомогательный посредник и вполне понятно, что окончательные результаты получаются сходными с результатами теории дальнего действия. Но если поле как объективная реальность может существовать независимо от обычных тел, его возбуждающих, то в чём проявляется его существование?

Получив уравнения электромагнитных волн и установив основные свойства этих волн, Максвелл приходит к тому новому выводу, что электромагнитные волны, а следовательно, и световые должны оказывать давление на те тела, на которые они падают. Но если это так, то они должны обладать механическими характеристиками, импульсом. Однако Максвелл, как мы видели в предыдущей главе, не приписывал полю никаких механических свойств, кроме энергии, а свой вывод основывал на идее статических натяжений и давлений силовых трубок. Закономерен ли такой переход от статики к такому ярко выраженному динамическому понятию, как волна?

Все эти вопросы требовали дальнейшего развития понятия поля и его характеристики.

Первый и важнейший шаг в направлении углубления теории поля, сделанный, однако, совершенно независимо от максвелловской концепции, принадлежал русскому физику Н. А. Умову, введшему понятие о движении и потоке энергии.

В своей работе «Уравнения движения энергии в телах», появившейся в год выхода «Трактата» Максвелла (1873), Умов развивает следствия из представления о локализации энергии в среде. Каждому элементу объёма среды, частицы которой находятся в движении, приписывается энергия, представляющая «сумму живых сил частиц и элементов и их потенциальной энергии». Умов ставит своей задачей установить в общем виде «законы перехода энергии с одного элемента среды на другой», установить «на общих началах» учение о движении энергии в средах. Исходя из закона сохранения энергии, Умов выводит уравнение движения энергии в среде. Если обозначить объёмную плотность энергии в данной точке среды $\mathcal{E}$ через l_x , l_y , l_z — слагающие скорости движения энергии в этой точке, то убыль плотности энергии в точке со временем будет определяться уравнением

$$-\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial t} = \frac{\partial \mathcal{E} l_x}{\partial x} + \frac{\partial \mathcal{E} l_y}{\partial y} + \frac{\partial \mathcal{E} l_z}{\partial z}. \quad (1)$$

«Выражение (1), аналогичное с выражением закона сохранения вещества в гидродинамике, есть выражение элементарного закона сохранения энергии в телах»,¹ — пишет Умов. Из этого уравнения можно установить «связь между количеством энергии, отнесённым к единице времени, вытекающим в среду через её границы, и изменением количества энергии в среде».

Связь эта выражается интегральным соотношением (теоремой Умова).

$$\iiint \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial t} dx dy dz + \iint \mathcal{E} l_n d\sigma = 0.$$

Вектор $\vec{l}\mathcal{E}$ определяет поток энергии, текущей в единицу времени через единицу площадки, нормальную к этому вектору. Это и есть знаменитый вектор Умова.

Частный случай теоремы Умова и, следовательно, вектора Умова, случай электромагнитного поля, был рассмотрен Пойнтингом, о чём мы скажем дальше, и теорема энергии для этого случая нередко называлась теоремой Пойнтинга, а соответствующий вектор интенсивности потока энергии вектором Пойнтинга. В настоящее время употребляется исторически правильное название: вектор Умова-Пойнтинга и теорема Умова-Пойнтинга.

¹ Н. А. Умов, Избр. соч., Гостехиздат, 1950, стр. 154.

Применяя свою теорему к упругой среде, Умов выводит важное следствие: «количество энергии, притекающее через бесконечно малый плоский элемент в бесконечно малое время, равно отрицательной работе сил упругости, действующих на этот элемент»¹. Отсюда можно найти связь между силами давления или натяжения и вектором Умова. Связь эта записывается в виде равенства:

$$p i_p = - \partial l_n;$$

здесь i_p — слагающая скорости элементарной площадки по направлению силы упругости.

Таким образом поток энергии, оказывается, ведёт необходимым образом к существованию сил давления (световое давление в теории Максвелла), что в свою очередь ведёт к идее количества движения поля. По этой программе, содержащейся в теории Умова, и шло развитие электромагнитной теории света: было доказано теоретически и экспериментально существование потока электромагнитного излучения и существование давления излучения, были введены понятия электромагнитного количества движения и момента количества движения.

В 1923 г. профессор Московского университета А. И. Б а ч и н с к и й опубликовал интересное неоконченное письмо Умова к неизвестному лицу, связанное с его учением о движении энергии. Несомненно, что наибольшую трудность для восприятия этого учения представлял вопрос о движении потенциальной энергии. Об этом и идёт речь в письме. Диссертация Умова представляла собой развитие его взглядов на энергию и взаимодействие, опубликованных в статьях «Теория взаимодействий на расстояниях конечных и её применение к выводу электростатических и электродинамических законов» (1872), «Теория простых сред и её приложение к выводу электростатических и электродинамических законов» (1873). Как видим, речь идёт здесь уже непосредственно об электродинамических теориях. Здесь Умов развивает ту мысль, что потенциальная энергия есть не что иное, как кинетическая энергия скрытых масс, и что закон сохранения энергии может быть сформулирован как закон сохранения живых сил:

«а) Всякое изменение в величине живой силы обуславливается её переходом с частиц одной среды на частицы других сред, или же с одних форм движения на другие.

б) Определённое количество живой силы остаётся себе равным при всякой смене явлений.

в) Количество живых сил природы неизменно».

Неизвестный корреспондент, повидимому, возражал Умову примером, что при неупругом ударе живая сила теряется. Аргументы Умова поразительно напоминают аргументы Энгельса в заметке «Мера движения. Работа» («Диалектика природы»): «Не скажете ли вы, что количество тепла, развившееся от удара, выраженное в механических единицах, равно живой силе, потерянной ударившимся неупругим телом? И вы будете вполне правы. Отсюда следует, что и в случае столкновения н е у п р у г и х тел сумма живых сил их частиц остается тою же (теплота есть движение), как и до удара. После этого я не понимаю: каким образом вы пишете, что опыт показывает, что живая сила теряется? Надо прибавить, что теряется живая сила только известного рода движения, но её всегда можно отыскать в движении другого вида. Если механика учит, что сохраняется только

¹ Н. А. У м о в, Избр. соч., стр. 158.

количество движения, то потому, что она смотрит только на движения явные, и ещё потому, что она — механика «рациональная», а не механика природы¹.

Далее Умов поясняет свою идею таким примером. Положим, что имеются два невзаимодействующих на расстояние тела в несжимаемой жидкости. Тогда закон сохранения энергии для них может быть записан в виде

$$T_1 + T_2 + T = \text{const}; \quad (1)$$

T_1 и T_2 — кинетические энергии тел, T — кинетическая энергия частиц жидкости. Если же принять действие на расстояние, то закон сохранения энергии напишется в виде

$$T_{12} + T_2 = \Pi \quad (2)$$

(Π — потенциальная энергия).

Сравнивая (1) и (2), — пишет Умов, — я нахожу

$$\Pi = T + \text{const} \quad (3)$$

или, при известном выборе постоянного:

$$\Pi = T. \quad (3 \text{ bis})$$

Это значит, что потенциальная энергия равна сумме живых сил промежуточной среды. Этот вывод и следствия, из него вытекающие, и составляют мою вину².

Далее Умов показывает, как из его теории вытекают понятия силы и массы. В его теории «сила имеет настолько реальное значение, насколько она имеет отношение к ускорению. Последнее же вызывается превращениями живой силы в промежуточной среде». О массе Умов говорит следующим образом. «Если слово атом я заменяю словом «центр прерывности», или просто «точка, в которой нарушается непрерывность среды, разлитой в мировом пространстве», то число таких центров, умноженное на некоторый специфический коэффициент (если все центры однородны, т. е. состоят из частиц одного и того же вещества, как мы обыкновенно говорим), есть масса».

В конце письма Умов поднимает вопрос об источнике движения камня, падающего на землю. «Изменившееся положение камня есть признак происшедших перемен в явлении, и не больше. Неужели в мёртвом геометрическом различии положений можно искать источник живой силы? Ясно, что нет, геометрия не создает вам движения; надо искать, следовательно, явление, которое по своей напряжённости равнялось бы потерянной живой силе³. Так Умов повторяет мысль и аргументы Ломоносова, приведшие последнего к формулировке принципа сохранения движения и к идее движущейся «тяготительной материи».

Таковы идеи Умова, сыгравшие важную роль в развитии физики поля. Они открыли путь к решению таких задач, в которых энергия не остаётся между взаимодействующими телами, а распространяется в пространстве, теряя связь со своими источниками. Конечно, эти новые идеи не могли быть усвоены в науке сразу, без борьбы. Однако развитие науки делало неизбежным торжество учения о движении энергии.

¹ А. И. Бачинский, К истории русской науки, журн. У.Ф.Н., т. III, вып. 2—3, 1923, стр. 257.

² Там же, стр. 260.

³ Там же, стр. 261.

В 1883 г. Фитцджеральд показал для частного случая кругового переменного тока существование энергии, теряемой излучением. Он вычислил из выражения запаздывающего потенциала такой системы энергию, заключенную в сфере радиуса r . Полная энергия, теряемая вследствие излучения за единицу времени, не зависит от радиуса и равна

$$e = (\pi a^2 c_0)^3 \frac{8\mu\pi^4}{3V^3 T^4},$$

где a — радиус круга, C_0 — амплитуда тока, V — скорость электромагнитной волны, T — период изменения тока. Эта энергия очень мала, если T не слишком мало. Фитцджеральд предложил сконструировать излучатель в виде конденсатора, разряжающегося через проволочную петельку («магнитный осциллятор»).

В следующем 1884 г. появилась работа Дж. Г. Пойнтинга «О переносе энергии в электромагнитном поле», содержащая упомянутую выше теорему Умова-Пойнтинга. В этой работе Пойнтинг становится на точку зрения, развитую 10 лет назад Умовым: «Если мы признаем, — пишет Пойнтинг, — непрерывность движения энергии, т. е. признаем, что при исчезновении энергии в одной точке и появлении в другой она должна была пройти через промежуточное пространство, то мы принуждены сделать вывод, что окружающая среда содержит, по крайней мере, часть энергии и способна передавать энергию от точки к точке»¹. Далее, опираясь на представления Максвелла о локализации энергии в поле, Пойнтинг так формулирует основную мысль работы:

«Цель настоящей статьи — доказать, что имеется общий закон переноса энергии (добавим — установленный в 1873 г. Умовым), согласно которому энергия в любой точке движется перпендикулярно к плоскости, содержащей линии электрической и магнитной сил, и что количество энергии, протекающее через единицу поверхности этой плоскости в секунду, равно произведению величин этих двух сил, умноженных на синус угла между ними и деленному на 4π ». Так, по Пойнтингу, определяется вектор Умова для случая электромагнитного поля.

Математический вывод теоремы и её применение к случаю превращения энергии в проводнике, обтекаемом током, и к случаю электромагнитной волны вошли ныне во все учебники электричества, и на них мы останавливаться не будем.

На этом мы закончим рассмотрение развития теории Максвелла до опытов Герца. Дальнейшее развитие учения о потоке энергии тесно связано с учением о механических действиях света, и мы вернёмся к нему уже после опытов Герца.

Опыты Герца. Прежде чем переходить к истории опытов Герца, мы должны остановиться на истории учения об электрических колебаниях.

Первое по времени упоминание об электрическом процессе колебательного характера, повидимому, принадлежит известному американскому физiku Джозефу Генри (1797—1878). В 1842 г. в «Трудах Американского философского общества» появилось сообщение о его опытах по изучению индукционного действия разряда батареи лейденских банок. Направление индуктированного тока в этих опытах определялось полярностью намагничивания стальной иглы, помещённой в катушку, составляющую

¹ «Из предистории радио», Сборник, сост. проф. С. М. Рытов, АН СССР, 1948, стр. 233.

часть электрической цепи. При этом, однако, как указывает Генри, «возникали некоторые сомнения в отношении правильности показаний направления тока этим путём, с тех пор как г-н Савари опубликовал в 1826 г. сообщение о том, что когда несколько игл располагаются на различном расстоянии над проволокой, через которую проходит разряд лейденской батареи, то они намагничиваются в различных направлениях, и что путём последовательного усиления разряда через катушку достигается несколько перемен полюсов у находившихся над ней игл». Перед Генри, таким образом, встала задача изучить явление; открытое Саваром, и он нашёл, что при пользовании большими иглами не наблюдалось никакой перемены намагничивания, хотя их было намагничено около тысячи. Намагничивание всегда соответствовало направлению разряда. Однако, когда были применены очень тонкие иглы, наблюдалось несколько перемен полярности «простым увеличением количества электричества, в то время как направление разряда оставалось прежним». Отсюда Генри сделал заключение: «Разряд, какова бы ни была его природа, не представляется (пользуясь для простоты теорией Франклина) единичным переносом невесомого флюида с одной обкладки на другую. Обнаруженное явление заставляет нас допустить *существование главного разряда в одном направлении, а затем несколько отражённых действий взад и вперёд, каждое из которых является более слабым, чем предыдущие, продолжающихся до тех пор, пока не наступит равновесие*»¹.

В подчёркнутых в подлиннике словах содержится, как видим, вполне ясное описание разряда батареи конденсаторов, происходящего в форме затухающих колебаний.

Трудно сказать, знал ли об этой работе Гельмгольц, когда писал свою знаменитую книгу «О сохранении силы» (1847), — во всяком случае он о ней не упоминает. Говоря о наблюдениях Рисса, показавшего, что тепло, выделяемое при разряде банок, пропорционально Q^2/S (Q — заряд, а S — площадь обкладок), и наблюдениях Геера и Кнохенхауера, нашедших, что это тепло при одинаковом заряде батареи не зависит от свойств замыкающей проволоки, Гельмгольц пишет:

«Этот закон весьма легко объясняется, если мы разряд батареи будем представлять не как простое движение электричества в одном направлении, но как течение его то в одну, то в другую сторону между двух обкладок в виде колебаний, которые делаются всё меньше и меньше, пока, наконец, вся живая сила не будет уничтожена суммой сопротивлений»². В этом месте русского перевода книги Гельмгольца переводчик акад. П. П. Лазарев сделал примечание: «Это явление было впоследствии строго доказано рядом исследователей, среди которых нужно назвать Н. Н. Шиллера, Феддерсена и др.»³. Этим экспериментальным исследованием предшествовала теоретическая работа Вильяма Томсона (1824—1907) «О преходящих электрических токах» (1853), в которой автор ставил задачей «определение движения электричества в любой момент после того, как назлектризованный проводник заданной ёмкости, заряженный первоначально определённым количеством электричества, соединён с землёй проволокой или другим линейным проводником данной формы и сопротивления». Томсон нашёл, что это движение описывается линейным дифференциальным уравнением 2-го порядка

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{k}{A} \frac{dq}{dt} + \frac{1}{CA} \cdot q = \omega.$$

¹ «Из предистории радио», стр. 243—244.

² Г. Гельмгольц, О сохранении силы, М.—Л., ОНТИ, 1934, стр. 83.

³ «Из предистории радио», стр. 247.

Здесь q — количество электричества, k — сопротивление разрядника, A — «постоянная, которую можно назвать электродинамической ёмкостью разрядника» (т. е. индуктивностью), C — электрическая ёмкость главного проводника.*

Томсон нашёл известное решение этого уравнения и показал, что характер процесса определяется выражением

$$\alpha' = \left(\frac{1}{CA} - \frac{k^2}{4A^2} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (4)$$

Если $\frac{k^2}{4A^2} > \frac{1}{CA}$ — разряд аperiодический; если же, наоборот, $\frac{1}{CA} > \frac{k^2}{4A^2}$, то разряд будет носить характер затухающих колебаний с полупериодом:

$$T = \frac{\pi}{\left(\frac{1}{CA} - \frac{k^2}{4A^2} \right)^{\frac{1}{2}}}. \quad (5)$$

11 августа 1882 г. Томсон сделал добавление, в котором указывал, что его теория нашла экспериментальное подтверждение в опытах Феддерсена (1859) и Н. Н. Шиллера (1874). В 1857 г. Кирхгоф (1824—1887) показал, что процесс заряжения в проводе носит волновой характер, вследствие чего в проводе конечной длины возникают стоячие волны, аналогичные стоячим звуковым волнам в стержне. Так же как и в случае звука, здесь возможны основные колебания и обертоны. Существенно, что, исходя из веберовских представлений о мгновенном взаимодействии, Кирхгоф пришёл к выводу о конечной скорости распространения зарядов, совпадающей со скоростью света. Однако весь процесс описывался параметрами *п р о в о д а* (его ёмкостью и индуктивностью) и, следовательно, в данном случае представления о движении поля в окружающем пространстве не могли возникнуть.

В 1858 г. появилась работа Феддерсена «Материалы к познанию электрической искры». Для исследования искры Феддерсен применил вращающееся зеркало и, наблюдая изображение искры в этом зеркале, убедился, что разряд может быть как непрерывным, так и прерывистым, состоящим из серии последовательных разрядов. В работе 1859 г. «Об электрическом волновом движении» Феддерсен указывает, что Гельмгольц, а затем Томсон доказали теоретически возможность колебательного разряда; «в затрагиваемом здесь вопросе, — пишет Феддерсен, — теория в настоящее время ушла существенно вперёд».

Ещё более детально, чем Томсон, Кирхгоф проследил закон движения электричества в проводе и нашёл его волновой характер. Однако это явление, несмотря на различные косвенные подтверждения, экспериментально доказать не удалось. «Исследования разряда лейденской банки, — продолжает Феддерсен, — при разнообразнейших условиях... дали мне возможность не только определённо доказать вообще существование разрядов этого рода, но также в частных случаях сравнить результаты вычислений с опытом». Метод вращающегося зеркала с последующим проектированием изображения на фотографическую пластинку «даёт мне возможность спокойно изучать это мгновенное явление свободным от всякого субъективного заблуждения и измерять величины времени как отрезки»¹.

¹ «Из предистории радио», стр. 272—273.



Г. Герц

Таким путём Феддерсену удалось с несомненностью доказать колебательный характер электрического разряда лейденской банки. В работе 1862 г. «Об электрическом разряде лейденской банки» Феддерсен приводит многочисленные фотографии и данные, показывающие, что период колебания не зависит от величины заряда и пропорционален корню квадратному из числа банок, т. е. ёмкости батареи.

В уже рассмотренной нами работе Н. Н. Шиллера 1874 г. применялся метод маятника Гельмгольца. Маятник размыкал сначала цепь первичной обмотки индукционной катушки, а затем вторичную цепь, в которой индуктировались колебания. Измеряя остаточное напряжение на конденсаторе в различные фазы, можно было построить кривую колебания и таким путём точно определить период. Это дало возможность не только проверить формулу Том-

сона, но и применить её для определения диэлектрических постоянных, что и составляло цель работы.

Наконец, в 1885 г. А. Обербек наблюдал явление электрического резонанса; однако детальная теория явления, равно как и экспериментальное исследование связанных колебаний, были даны В. Бьеркнесом в 1891 г. Теория связанных колебаний в индукционной катушке была дана в том же 1891 г. Р. А. Колли. Таково было состояние учения об электрических колебаниях к моменту, когда Герц занялся своими знаменитыми исследованиями.

Генрих Герц родился 22 февраля 1857 г. в Гамбурге в семье юриста-консультанта. Вначале он предполагал избрать инженерную карьеру и учился в Дрезденской, а затем Мюнхенской технической школе, но затем твёрдо решил посвятить себя физике и весной 1878 г. приехал в Берлин для работы в лаборатории Гельмгольца. «Уже из знакомства с его элементарными работами, — писал Гельмгольц, — я убедился, что имею дело с человеком, одарённым действительно выдающимися способностями». Вскоре Гельмгольц предложил ему тему для научной работы из области электродинамики.

Гельмгольц указывает в своей посмертной биографии Герца, что руководящим мотивом в выборе темы для молодого Герца было желание заинтересовать его актуальной научной проблемой. «В ту пору область электродинамики представляла собой хаотическое царство, в котором трудно было разобраться. . . Я попытался разобраться в этой путанице и решил разработать по мере своих сил область электродинамики; для этого я рассмотрел те характерные для каждой теории следствия, которые могли бы иметь решающее значение в вопросе о принятии её, причём я имел в виду разрешить эти вопросы при помощи подходящих экспериментов»¹.

Нам уже приходилось говорить о теории Гельмгольца. Она носила компромиссный характер и в этот критический для теории электричества

¹ Г. Гельмгольц, Жизнь и труды Генриха Герца, М., 1906, стр. 12.

период представляла собой немалую опасность, вклинившись между теорией Максвелла и теориями дального действия и увеличив тем самым ту путаницу, о которой говорит Гельмгольц. Вспомним, как неблагоприятно она отразилась на исследованиях Зилова. Она долгое время мешала и Герцу правильно осмыслить наблюденные им факты. В связи с этим, следуя указанию Максвелла, что история науки должна описывать не только успехи, но и вскрывать ошибки, в которые впадали нередко самые выдающиеся деятели науки, мы остановимся теперь на теории Гельмгольца подробнее.



Рис. 94. Опыт с высокочастотным разрядом

Теория Гельмгольца отличается от теории дального действия тем, что она учитывает влияние среды: диэлектрик в электрическом поле поляризуется. Напряжённость поля в какой-нибудь точке складывается из силы, вызванной заряжёнными проводниками, т. е. чистого дального действия, и силы, вызванной поляризацией — действия посредством диэлектрика.

Компоненты электрического тока в какой-либо точке диэлектрика, наоборот, определяются только изменениями поляризации диэлектрика в рассматриваемой точке; никакие изменения зарядов на находящихся в другом месте проводниках ничем не проявляются. . . Таким образом, теория Гельмгольца отличается от теории Максвелла тем, что не рассматривает тока смещения в чистом эфире, и тем, что наряду с действием посредством изолятора допускает существование непосредственного дального действия.

Вследствие поляризации диэлектрика в каждом элементе объёма его возникает электрический момент, вектор которого пропорционален действующему электрическому полю. Компоненты вектора электрического момента единицы объёма f, g, h связаны с компонентами X, Y, Z вектора напряжённости электрического поля уравнениями:

$$f = \epsilon X, \quad g = \epsilon Y, \quad h = \epsilon Z.$$

Вследствие поляризации диэлектрика напряжённость поля в нём изменяется и соответствующие вычисления приводят к выражению поля точечного заряда в диэлектрике.

$$E = \frac{1}{1 + 4\pi\epsilon} \cdot \frac{e}{r^2}.$$

Величина $\epsilon = 1 + 4\pi\epsilon$ называется диэлектрической постоянной поляризующего пространства. Сила взаимодействия двух зарядов e и e' представится, следовательно, выражением:

$$K = \frac{1}{\epsilon} \frac{ee'}{r^2}.$$

Герц во введении к своим исследованиям «Лучей электрической силы» даёт очень наглядное сопоставление различных точек зрения на механизм

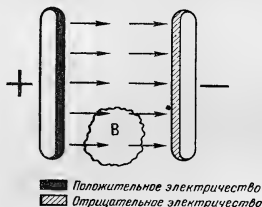


Рис. 95. Картина электрических взаимодействий с точки зрения теории дальнего действия

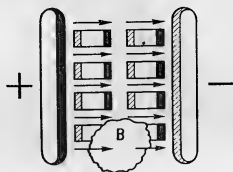


Рис. 96. Электрические взаимодействия по теории Гельмгольца

взаимодействия двух тел. С точки зрения теории дальнего действия «притяжение двух тел мы рассматриваем как род их взаимной духовной склонности. Сила, которую порождает каждое из двух тел, связана с наличием второго тела. Для того чтобы вообще имела какая-нибудь сила, необходимо наличие, по крайней мере, двух тел»¹.

Но теория дальнего действия может быть сведена к теории потенциала — формальному близкодество. При этом предполагается, что даже в случае одного тела в окружающем пространстве имеется «стремление к притяжению», созданное присутствием этого тела. «Непрерывно изменяющимся от точки к точке стремлением такого рода мы наполняем мысленно всё пространство. В то же самое время мы не предполагаем наличия в месте действия силы какого-либо изменения пространства, которое позволило бы нам назвать это место местопребыванием силы, напротив — мы попрежнему считаем местопребыванием и причиной силы само действующее тело»². При атематическом описании такой концепции мы вводим векторные функции точки — напряжённости поля, и скалярные функции — потенциалы, для которых могут быть написаны дифференциальные уравнения. Для наглядного представления этой концепции Герц рисует заряженные пластины конденсатора с пространством между ними, заполненным силами. «Заполнено ли пространство между пластинками или пусто — с этой точки зрения безразлично (рис. 95). Таким образом, если принять существование

¹ «Из предистории радио», стр. 126.

² Там же.

светового эфира, но представить себе, что он удалён из объёма B , то сила в этом пространстве всё равно остаётся неизменной».

«Третья точка зрения сохраняет представления второй, но добавляет к ним одно усложнение. Она полагает, что действие удалённого тела определяется не одними лишь непосредственными дальнедействующими силами. Напротив, она считает, что в пространстве, которое мыслится всюду заполненным, силы вызывают такие изменения, которые с своей стороны вызывают новые дальнедействующие силы. Притяжение разделённых средой тел основывается тогда частично на непосредственном действии этих тел на расстоянии, частично же на влиянии изменённой среды. Изменение самой среды мыслится как электрическая или, соответственно, магнитная поляризация её мельчайших частей под влиянием действующей силы».

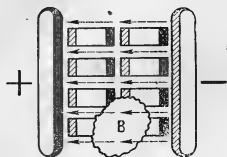


Рис. 97. Смещение зарядов в теории Максвелла

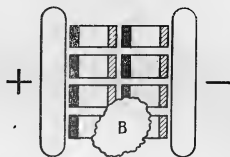


Рис. 98. Картина взаимодействия с точки зрения теории близкодействия

Это и есть точка зрения Гельмгольца, которая была развита в магнетостатике Пуассоном и в электростатике Моссотти. «Если мы представим себе, что пространство между пластинами содержит лишь световой эфир, и сделаем в нём полость такого вида, как B , то силы в этой полости сохранятся, но поляризация исчезнет»¹.

Итак, в теории Гельмгольца допустима и поляризация эфира, и соответствующие характеристики эфира мы будем обозначать через η_n , ϵ_0 . Но заряды e и e' мыслятся измеренными в среде, свободной от поляризации, и отношение

$$c' = e : e_m,$$

где e — величина заряда в электростатической мере, e_m — в электромагнитной, не зависит от природы пространства.

Плотность тока в изоляторе, измеренная в электростатических единицах, в теории Гельмгольца определяется компонентами:

$$u_e = \frac{\partial f}{\partial t}; \quad v_e = \frac{\partial g}{\partial t}; \quad w_e = \frac{\partial h}{\partial t}.$$

Следовательно,

$$u_e = \frac{\epsilon - 1}{4\pi} \frac{\partial X}{\partial t}; \quad v_e = \frac{\epsilon - 1}{4\pi} \frac{\partial Y}{\partial t}; \quad w_e = \frac{\epsilon - 1}{4\pi} \frac{\partial Z}{\partial t}.$$

Кроме того,

$$u_e = c' u; \quad v_e = c' v; \quad w_e = c' w,$$

где u , v , w — компоненты плотности тока, измеренные в электромагнитной системе.

¹ «Из предистории радио», стр. 127.

Связь между компонентами поляризованного тока и компонентами напряжённости магнитного поля H (α , β , γ) в теории Гельмгольца выражается уравнениями:

$$4\pi u = \frac{\partial \gamma}{\partial y} - \frac{\partial \beta}{\partial z} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial t};$$

$$4\pi v = \frac{\partial \alpha}{\partial z} - \frac{\partial \gamma}{\partial x} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y \partial t};$$

$$4\pi w = \frac{\partial \beta}{\partial x} - \frac{\partial \alpha}{\partial y} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z \partial t}.$$

В современных обозначениях:

$$4\pi \vec{P} = \text{rot } \vec{H} + \text{grad } \dot{\psi}.$$

В теории Гельмгольца последний член оказался необходимым потому, что токи вообще, например при разряде конденсатора в неполяризуемом пространстве, незамкнуты.

Поэтому

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = - \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{1}{4\pi} \frac{\partial}{\partial t} \Delta \psi.$$

$$\Delta \psi = -4\pi \rho.$$

Таким образом ψ — электрический потенциал, созданный распределением истинных зарядов.

Далее из закона индукции получаются уравнения, идентичные с уравнениями Максвелла:

$$\mu \frac{\partial \alpha}{\partial t} = \frac{\partial Q}{\partial z} - \frac{\partial R}{\partial y};$$

$$\mu \frac{\partial \beta}{\partial t} = \frac{\partial R}{\partial x} - \frac{\partial P}{\partial z};$$

$$\mu \frac{\partial \gamma}{\partial t} = \frac{\partial P}{\partial y} - \frac{\partial Q}{\partial x},$$

где

$$P = c'X, \quad Q = c'Y, \quad R = c'Z$$

— компоненты напряжённости электрического поля, измеренные в электромагнитной системе. Так как магнетизма нет, то

$$\frac{\partial \alpha}{\partial x} + \frac{\partial \beta}{\partial y} + \frac{\partial \gamma}{\partial z} = 0.$$

Мы можем установить связь между X , Y , Z и α , β , γ посредством системы уравнений

$$\frac{\epsilon - 1}{c'} \frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial \gamma}{\partial y} - \frac{\partial \gamma}{\partial z} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial t} \text{ и т. д.}^{\circ}$$

.....

$$\frac{\mu}{c'} \frac{\partial \alpha}{\partial t} = \frac{\partial Y}{\partial z} - \frac{\partial L}{\partial y} \text{ и т. д.}$$

Из этих уравнений для компонент магнитной силы получим уравнения:

$$\frac{\mu (\epsilon - 1)}{c'^2} \frac{\partial^2 \alpha}{\partial t^2} = \Delta \alpha;$$

$$\frac{\mu (\epsilon - 1)}{c'^2} \frac{\partial^2 \beta}{\partial t^2} = \Delta \beta;$$

$$\frac{\mu (\epsilon - 1)}{c'^2} \frac{\partial^2 \gamma}{\partial t^2} = \Delta \gamma.$$

Отсюда для плоских волн получаем: магнитная сила может распространяться только поперечными волнами с конечной скоростью

$$\frac{c'}{\sqrt{\mu (\epsilon - 1)}}.$$

Что же касается электрической силы, то мы её разлагаем на две части: безисточниковую X_1, Y_1, Z_1 и безвихревую X_2, Y_2, Z_2 .

Для первой

$$\frac{\partial X_1}{\partial x} + \frac{\partial Y_1}{\partial y} + \frac{\partial Z_1}{\partial z} = 0,$$

тогда как $\frac{\partial Y_1}{\partial z} - \frac{\partial Z_1}{\partial y}$ и т. д. отличны от нуля; для второй — наоборот:

$$\frac{\partial Y_2}{\partial z} - \frac{\partial Z_2}{\partial y} = \frac{\partial Z_2}{\partial x} - \frac{\partial X_2}{\partial z} = \frac{\partial X_2}{\partial y} - \frac{\partial Y_2}{\partial x} = 0,$$

тогда как

$$\frac{\partial X_2}{\partial x} + \frac{\partial Y_2}{\partial y} + \frac{\partial Z_2}{\partial z} \neq 0.$$

Для этих величин будут иметь место уравнения:

$$\frac{\mu (\epsilon - 1)}{c'^2} \frac{\partial^2 X_1}{\partial t^2} = \Delta X_1 + A;$$

$$\frac{\mu (\epsilon - 1)}{c'^2} \frac{\partial^2 Y_1}{\partial t^2} = \Delta Y_1 + B;$$

$$\frac{\mu (\epsilon - 1)}{c'^2} \frac{\partial^2 Z_1}{\partial t^2} = \Delta Z_1 + C;$$

$$\frac{\mu (\epsilon - 1)}{c'^2} \frac{\partial^2 X_2}{\partial t^2} = \frac{\mu}{c'} \frac{\partial^3 \psi}{\partial x \partial t^2} - A;$$

$$\frac{\mu (\epsilon - 1)}{c'^2} \frac{\partial^2 Y_2}{\partial t^2} = \frac{\mu}{c'} \frac{\partial^3 \psi}{\partial y \partial t^2} - B;$$

$$\frac{\mu (\epsilon - 1)}{c'^2} \frac{\partial^2 Z_2}{\partial t^2} = \frac{\mu}{c'} \frac{\partial^3 \psi}{\partial z \partial t^2} - C,$$

где A, B, C — неизвестные величины. Но из безвихревого характера X_2, Y_2, Z_2 нетрудно вывести, что

$$\frac{\partial B}{\partial z} - \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{\partial A}{\partial z} = \frac{\partial A}{\partial y} - \frac{\partial B}{\partial x} = 0.$$

Следовательно,

$$A = -\frac{\partial X}{\partial x}, \quad B = -\frac{\partial X}{\partial y}, \quad C = -\frac{\partial X}{\partial z}.$$

Но тогда из первой группы уравнений следует $\Delta X = 0$ и так как всё пространство мы мыслим однородным диэлектриком, то $X = \text{const}$, $A = B = C = 0$. Но в таком случае вектор X_1, Y_1, Z_1 представляет собой поперечную волну электрической силы, распространяющуюся со скоростью

$$c' : \sqrt{\epsilon (\epsilon - 1)}.$$

Так как оставшаяся безвихревая часть поля может быть представлена как градиент некоторого скаляра φ

$$X_2 = -\frac{\partial \varphi}{\partial x}, \quad Y_2 = -\frac{\partial \varphi}{\partial y}, \quad Z_2 = -\frac{\partial \varphi}{\partial z},$$

то мы получаем:

$$\frac{\epsilon - 1}{c^2} \varphi = \psi,$$

где ψ есть электрический потенциал истинных зарядов, представляющий непосредственное дальное действие. Если заряды изменяются, то они вызывают распространяющуюся мгновенно продольную электрическую волну.

Итак, скорость распространения поперечных волн в эфире равна $c' : \sqrt{\epsilon_0 - 1}$. Так как силы взаимодействия в воздухе очень мало отличаются от таковых в эфире, то и в воздушном пространстве скорость распространения поперечных волн приблизительно равна $c' : \sqrt{\epsilon_0 - 1}$.

Этот результат не может быть подтверждён на опыте, так как мы не можем измерить отношение единиц c' в неполяризованной среде (эфир ведь принимался поляризуемым). Однако между отношением единиц c' в неполяризуемой среде и отношением единиц c в эфире (или воздухе), где диэлектрическая постоянная ϵ_0 , существует зависимость

$$c' = \sqrt{\epsilon_0} c,$$

так как заряжённые тела в эфире взаимодействуют друг с другом слабее, чем в неполяризуемой среде в отношении $1 : \epsilon_0$. Постоянная c известна из опыта и равна $3 \cdot 10^{10} \frac{\text{см}}{\text{сек}}$. Таким образом, скорость распространения поперечных электромагнитных волн в эфире (или в воздухе), по теории Гельмгольца, равна:

$$c = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\epsilon_0 - 1}}.$$

Итак, в теории Максвелла скорость распространения электромагнитных волн в эфире равна c , в теории Гельмгольца $c = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\epsilon_0 - 1}}$, в среде она, по теории Максвелла, относится обратно $\sqrt{\epsilon}$, в теории Гельмгольца $\sqrt{\epsilon - 1}$. Кроме того, в теории Гельмгольца существуют продольные волны, распространяющиеся с бесконечно большой скоростью. Отсюда видно, что теория Гельмгольца переходит в теорию Максвелла, если положить диэлектрическую постоянную всех сред, в том числе и эфира, очень большой срав-

нительно с единицей. Но тогда и восприимчивость становится очень большой и, следовательно, опосредствованное изолятором действие будет во много раз превышать дальноедействие.

Поскольку теория Гельмгольца допускает существование поляризационных токов, её выводы, равно как и выводы теории Максвелла, будут существенно отличаться от теории дальноедействия в случае незамкнутых токов. «Я пришёл,— пишет Гельмгольц,— к следующему общему выводу: все явления, которыми сопровождаются замкнутые токи, циркулирующие по замкнутым круговым металлическим проводникам и не испытывающие заметного изменения в величине электрического заряда,— все эти явления с одинаковым успехом можно дедуцировать из всех выше перечисленных гипотез¹. Все соответствующие обстоятельства вполне согласуются с законами Ампера и с законами Фарадея, Ленца и Ф. Неймана об общих свойствах индуцированных токов. Наоборот, те же гипотезы дают существенно различные выводы в применении к токам не вполне замкнутым». Как мы уже видели, опыты Н. Н. Шиллера решили вопрос в пользу теории близкодействия, согласно которой имеются только замкнутые токи и, как указывает Герц, отсюда «проистекает возможность распространить теорию на все виды электрического движения, несмотря на наше незнание законов для незамкнутых токов».

Чтобы устранить возможные из этого факта затруднения для своей теории, В. Вебер ввёл допущение, что электрические частицы обладают инерцией, которая и проявляется при внезапных перерывах цепи. Явление экстратоков, известное со времён Фарадея, аналогично инерции, но это не механическая «настоящая» инерция. «Настоящая инерция,— пишет Гельмгольц,— должна была зависеть только от массы передвигающегося электричества, а не от положения проволоки». Гельмгольц и предложил Герцу исследовать наличие такой инерции в экстратоках. Герц показал (и это была его первая крупная научная работа), что действию такой инерции «можно было приписать $\frac{1}{30}$ или, самое большее, $\frac{1}{20}$ экстратока». Это исследование Герца было удостоено премии. Герц продолжил свои исследования с системой прямолинейных проводников, расположенных перпендикулярно друг другу, и нашёл, «что экстраток, обусловленный инерцией, представляет собой самое большее $\frac{1}{250}$ величины индуцированного тока»².

В связи с этим следует вспомнить, что вопрос о механических свойствах электричества далеко не безразличен для теории Максвелла. «Действительно,— пишет Максвелл в главе VI тома II «Трактата»,— если бы электрические движения в какой-либо мере были сравнимы с движениями обыкновенной материи, существовали бы члены формы T_{me} и их существование обнаружилось бы наличием механической силы X_{me} »³. Как мы знаем, сам Максвелл производил эксперименты, имеющие целью обнаружить «инерцию электричества» и давшие отрицательный результат. Существенный шаг в этом направлении был сделан русским физиком Робертом Андреевичем Колли (1845—1891), учеником А. Г. Столетова.

Уже в своей магистерской диссертации «Исследование одного случая работы гальванического тока» (1876) Колли подвёл итоги начатых им ещё

¹ Речь идёт о гипотезах Вебера, Римана, К. Неймана, Клаузиуса и других перечисленных в начале этой главы.

² Г. Гельмгольц, Жизнь и труды Генриха Герца, стр. 25—35.

³ Дж. К. Максвелл, Избр. соч., стр. 437.

в 1872 г. экспериментов, имеющих целью обнаружить влияние механических сил (поля тяжести) на электрические процессы (ток в электролите). Если имеется вертикальная колонка, заполненная раствором электролита (азотнокислого серебра), то вследствие разности масс анионов и катионов (напомним, что в это время теория электрической диссоциации ещё не существовала, что придаёт мыслям Колли особую значимость) должна расходоваться некоторая часть энергии на поднятие более тяжёлых ионов. Отсюда должна существовать разница между силой тока, «нисходящего и восходящего по колонке электролита». Эта разница и была установлена Колли. Через пять лет, в 1881 г., он выступил со статьей «О существовании пондеро-электрокинетической энергии электромагнитного поля», в которой речь шла о возможности экспериментально обнаружить член T_{me} . Колли указывал, что этот член можно обнаружить, если экспериментировать не с металлами, а с электролитами, в которых «то, что мы называем электричеством, может двигаться не иначе, как вместе с материальным носителем...» Поэтому, как указывает Колли, в «момент прекращения тока» ион «вследствие инерции должен передать своё движение всему проводнику... появится, следовательно, некоторая пондеромоторная сила. Наоборот, при ускорениях и замедлениях проводника ион вследствие инерции должен отставать или, наоборот, опережать общую массу проводника, что вызовет появление электродвижущей силы»¹.

Германский физик Т. Де Кудр осуществил эксперименты, предложенные Колли. Опыты Де Кудра в свою очередь послужили отправным пунктом для известных опытов Стюарта и Толмена, в которых была доказана инерция электронов в металлах.

Те эксперименты, которые Герц проводил по предложению Гельмгольца, понятно, не могли послужить для открытия «инерции электричества». Докторская работа Герца была посвящена расчёту индукционных действий во вращающемся в магнитном поле проводящем шаре. В 1881 г. он разработал метод определения твёрдости по удару, в котором приложил результат своей теории соударения тел. Вслед за этим Герц занялся исследованием катодных лучей, в результате которых он отверг корпускулярную теорию этих лучей. С 1883 по 1885 г. Герц заведует кафедрой теоретической физики в Киле. Здесь он между прочим занимается метеорологическими вопросами.

В 1885 г. Герц принял приглашение в техническую школу в Карлсруэ. Здесь и были проведены его знаменитые исследования о распространении электрической силы.

Своим «Исследованиям» Герц предпосылает «Вводный обзор». Об этом обзоре Гельмгольц пишет: «К сожалению, у нас мало подобных трудов, открывающих нам внутреннюю психологическую историю науки; мы должны быть признательны автору за то, что он дал нам проникнуть глубоко в его мысли и даже в историю его минутных ошибок»². Вполне понятно, что мы при изложении истории открытий Герца не можем пройти мимо составленной им «внутренней психологической истории» этих открытий.

«Меня очень часто спрашивали, — начинает Герц, — каким образом я впервые пришёл к описанным выше опытам. Общим поводом к ним было следующее: в 1879 г. Академия наук в Берлине объявила в качестве работы на премию задачу — доказать экспериментально наличие какой-либо связи между электродинамическими силами и диэлектрической поляризацией изо-

¹ Цит. по В. М. Дукову, Развитие теории электромагнитного поля, до опытов Герца, У. Ф. Н., т. XLIX, вып. 4, 1953, стр. 593.

² Г. Гельмгольц, Жизнь и труды Генриха Герца, стр. 25—35.

ляторов — будь то электродинамическая сила, которая возбуждается процессами в непроводниках, или же поляризация непроводника силами электродинамической индукции. Так как я был занят тогда в Физическом институте в Берлине работами по электродинамике, господин фон Гельмгольц обратил моё внимание на указанную задачу и обещал мне поддержку института в случае, если я решусь заняться её разработкой»¹.

Таков был внешний повод к «Исследованиям». Однако предварительные расчёты, произведённые Герцем, показали ему, что при существующих экспериментальных средствах нет возможности экспериментально решить поставленную задачу. Нет достаточно чувствительного детектора, который

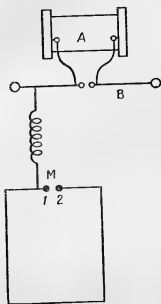


Рис. 99

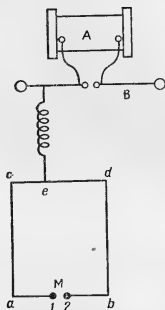


Рис. 100

мог бы обнаружить магнитное поле, созданное поляризационным током при наиболее благоприятных условиях: «при использовании колебаний лейденской банки и открытых индукционных аппаратов». «Поэтому, — пишет Герц, — я отказался от разработки этой задачи... Однако делом моего честолюбия оставалось всё же найти решение заданной тогда задачи каким-нибудь новым путём, и в то же время моё внимание было обострено в отношении всего, что связано с электрическими колебаниями».

Когда Герц переехал в Карлсруэ и там разыскал в физическом кабинете пару индукционных катушек, то экспериментирование с ними в порядке подготовки лекционных опытов открыло перед ним возможность получать и наблюдать быстрые электрические колебания. Период этих колебаний, как показали расчёты, измеряется стомиллионными долями секунды, т. е. частота колебаний в сотни раз превышала частоту колебаний, наблюдаемых Феддерсеном.

В результате экспериментов с этим генератором появилась первая работа этого цикла «О весьма быстрых электрических колебаниях» (1887).

Существенным итогом этого исследования было открытие Герцем не только высокочастотного генератора, способного излучать колебания, но и детектора этих колебаний — резонатора. Интересен путь, которым Герц пришёл к своему открытию.

¹ «Из предистории радио», стр. 112.

Цепь искрового микрометра (разрядный промежуток, длину которого можно изменять и измерять с помощью микрометрического винта) состояла из этого микрометра, замкнутого проводником прямоугольной формы. Одна из точек этого контура соединялась проводником с одной из точек разрядника индукционной катушки. При работе катушки в микрометре *M* проскакивают искры (рис. 99—100).

Герц интерпретировал факт образования смежных или побочных искр в смежном или побочном (вторичном) контуре микрометра тем, что изменение электрического потенциала, происходящее при разряде в первичной цепи, передаётся по соединительному проводу и сторонам прямоугольника шарикам *1* и *2* микрометра с конечной скоростью и вследствие разности путей не в одинаковое время. Поэтому между *1* и *2*, которые, казалось бы, должны иметь одинаковый потенциал, возникает разность потенциалов, вследствие которой образуются искры в микрометре.

«Это явление становится поразительным,— указывает Герц,— если принять во внимание, что электрические волны, насколько нам известно, распространяются в медных проволоках почти со скоростью света. Поэтому мне казалось достойным труда исследовать, какие условия будут способствовать появлению сильных искр в микрометре»¹. Вскоре он обнаружил, что в смежном (вторичном) контуре можно почти погасить искры, если присоединить его к цепи разрядника в «нейтральной» точке. Для симметричного контура это место присоединения лежит на середине контура, «так, чтобы пути от него до обоих шариков микрометра были равны». В этом случае «каждое изменение, распространяющееся через соединительный провод, будет достигать обоих шариков в одинаковых фазах, и разность потенциалов между ними не может появиться. Это предположение подтверждается

опытом»². Следовательно, в катушке генерировались настолько быстрые колебания, что на коротких расстояниях (в опытах Герца ширина прямоугольника была 80 см, а длина 125 см) можно было заметить различие в фазах электрической волны.

Итак, на первых шагах Герц не может ещё обойтись без соединительного провода, без замкнутых (или почти замкнутых) контуров, без представления о движении электричества

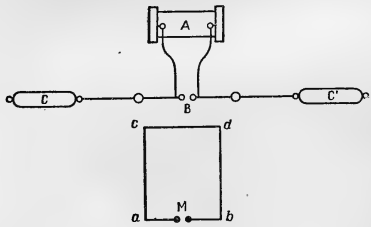


Рис. 101

(хотя бы и в форме волны) по проводу. Соединительная проволока его предварительных опытов явилась тем мостиком, по которому он перешагнул из привычного мира заряженных или обтекаемых токами проводников в новый мир электромагнитных волн в свободном пространстве.

Скоро эта соединительная проволока была отброшена, равно как и замкнутый контур. Герц перешёл к изучению индукционного действия открытого контура на вторичный контур. После некоторой эволю-

¹ «Из предистории радио», стр. 132.
² Там же, стр. 134.

ции (прямоугольный контур, прямоугольный контур с конечным проводником, с двумя проводниками на концах) Герц пришёл к форме первичного контура, известной ныне под названием вибратора Герца. Эту эволюцию можно проследить на рис. 99—103.

«Первичным проводником служила совершенно прямая медная проволока длиной 2,6 м и толщиной 5 мм. В середине она была разрезана для введения возбуждающего искрового промежутка. Оба маленьких шарика, между которыми происходил разряд, были насажены непосредственно на проволоку и соединены с полюсами индукционной катушки. На концах

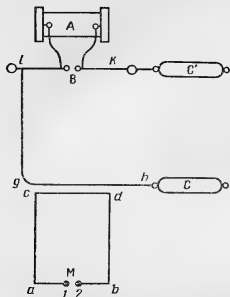


Рис. 102

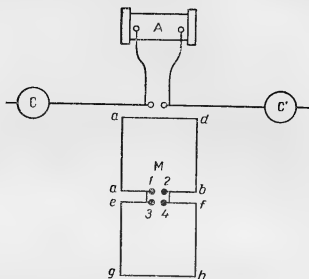


Рис. 103

проволоки были расположены два шара диаметром 30 см, изготовленные из толстого цинкового листа. Эти шары можно было передвигать по проволоке»¹ (рис. 101).

Изучая влияние своего вибратора на вторичный контур, Герц показал, что здесь имеет место явление *резонанса*: влияние будет наибольшим, когда периоды вибратора и резонатора совпадают.

В заключение Герц вычисляет период своей системы. В его расчёты вкралась ошибка, которую исправил Пуанкаре. Кроме того, он не анализирует влияние самого процесса в катушке на колебания вибратора. Процесс в индукционной катушке был рассмотрен Р. А. Колли в 1891 г., и им было показано, что здесь имеют место связанные колебания первичной и вторичной цепи, описываемые уравнениями:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 i_1}{dt^2} + \frac{w_1}{L_{11}} \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{L_{11} C_1} i_1 &= \frac{L_{12}}{L_{11}} \frac{d^2 i_2}{dt^2}; \\ \frac{d^2 i_2}{dt^2} + \frac{w_2}{L_{22}} \frac{di_2}{dt} + \frac{1}{L_{22} C_2} i_2 &= \frac{L_{12}}{L_{22}} \frac{d^2 i_1}{dt^2}. \end{aligned}$$

Колебания во вторичной катушке будут складываться из собственных колебаний с затуханием $\delta_1 = \frac{w_1}{2L_{11}}$ и периодом $T_1 = 2\pi \sqrt{L_{11} C_1}$ и вынужден-

¹ «Из предистории радио», стр. 140.

ных с затуханием $\delta_2 = \frac{\omega_2}{2L_{22}}$ и периодом $T_2 = 2\pi\sqrt{L_{22}C_2}$. Очевидно, что $\delta_2 > \delta_1$, так как самоиндукция с увеличением числа витков растёт быстрее, чем сопротивление. Поэтому во вторичной катушке можно считать только с собственными колебаниями по истечении определённого промежутка времени. Конечно, колебательный процесс в катушке сложен. Мы имеем три процесса: процесс в прерывателе, процесс в обмотке, процесс в разряднике. Последний является наиболее высокочастотным. Его влияние на колебания низкой частоты в катушке ничтожно, равно как и обратное влияние. Пуанкаре иллюстрировал этот факт с помощью тяжёлого длинного маятника, к линзе которого подвешен короткий лёгкий маятник. В этом случае колебания обоих маятников почти независимы. Герц прямо рассчитывает свой вибратор как независимую систему с одной степенью свободы. Если пренебречь омическим сопротивлением, то уравнение тока в вибраторе

$$O = -L \frac{di}{dt} + v_1 - v_2.$$

Герц полагал, что разность потенциалов между шарами связана с зарядом шара соотношением

$$e_m = c(v_1 - v_2),$$

и получил для полупериода выражение

$$T = \pi\sqrt{LC}.$$

На самом деле, как показал Пуанкаре, шары вибратора почти не влияют электрически друг на друга, и следует полагать

$$e_m = cv_1 \text{ и } v_1 = -v_2; \quad i = -\frac{de_m}{dt}.$$

Тогда

$$\frac{d^2i}{dt^2} + \frac{2}{LC}i = 0$$

и

$$T = \pi\sqrt{2LC}.$$

Периоды в опытах Герца оказались порядка $1-2 \cdot 10^{-8}$ сек и соответственно длина волны 5—6 м.

Герц указывает на важность экспериментального определения периода. «Такое измерение дало бы больше, чем простое подтверждение теории, оно послужило бы к её расширению». Что же касается цели его первого исследования, то она ограничивалась только «желанием показать, что и в коротких металлических проводниках могут быть возбуждаемы колебания, свойственные этим проводникам, и каким образом они могут быть осуществлены»¹.

При печатании этой работы Герц узнал о работе Бецоляда «Исследование электрических разрядов» (1870) и об опытах, проделанных в 1887 г. О. Лоджем, который, занимаясь теорией громоотвода, экспериментировал с разрядами очень маленьких конденсаторов, что привело его к наблюдению колебаний и волн в проводах. По поводу этих работ Лоджа Герц пишет:

¹ «Из предистории радио», стр. 147.

«Так как он стоял полностью на почве максвелловских воззрений и ревностно стремился доказать эти воззрения, то едва ли можно сомневаться, что, если бы я не опередил его, он тоже пришёл бы к наблюдению волн в воздухе и тем самым к доказательству того, что для распространения электрической силы требуется время»¹. По Герц был впереди, и Лоджу в дальнейшем оставалось только повторить и подтвердить его результаты.

Герц, однако, ещё не стоял полностью на максвелловской точке зрения, а находился в плену теории Гельмгольца; поэтому он не сразу пошёл на поиски волн в воздухе. Изучая взаимодействие вибратора и резонатора, он столкнулся с фактом взаимодействия «между одновременными электрическими искрами». «Я не был намерен позволить себе отвлечься из-за этого явления от моей основной цели, однако оно выступало в слишком определённой и загадочной форме для того, чтобы я мог полностью им пренебрегать»². В результате этого дополнительного исследования появилась работа «О влиянии ультрафиолетовых лучей на электрический разряд» (1887), из которой физический мир узнал об открытии фотоэффекта. «После того как я убедился, что имею дело только с ультрафиолетовыми лучами, я оставил эти опыты с тем, чтобы снова обратиться к основному вопросу», — писал Герц.

«Лето 1887 г. прошло в напрасных попытках доказать при помощи нового класса колебаний электродинамическое влияние изоляторов». Причину этих неудач вскрыл сам Герц. Она заключалась в том, что он находился в плену теорий дальнего действия и компромиссной теории Гельмгольца, которые могли руководить только в случае стационарных или квазистационарных процессов, «на деле же, — писал Герц, — я имел пред собою изменяющиеся состояния»³.

Герц стал пробовать различные положения вторичного проводника по отношению к первичному, и здесь открылись новые факты, прежде всего — наличие заметного действия на больших расстояниях, особенно изумившие Герца. Он писал: «особенно приводили меня в изумление все большие расстояния, вплоть до которых я мог обнаружить действие. До тех пор привыкли считать, что электрические силы убывают по закону Ньютона и, следовательно, с увеличением расстояния быстро становятся незаметными». Герц открыл теперь не это поле дальнего действия, связанное с своими источниками, а поле, отпочковавшееся от источника, напряжённость которого убывала обратно пропорционально первой степени расстояния. Эти открытия описаны им в работе «О влиянии прямолинейного электрического колебания на близлежащую цепь». Теперь он мог решить задачу Академии о влиянии изолятора на электродинамические силы, ибо благодаря этим исследованиям он «нашёл такие положения вторичного проводника, при которых приближение изолятора могло вызвать возникновение и исчезновение искр вместо того, чтобы только изменить их величину».

10 ноября 1887 г. он доложил сообщение «Об индукционных явлениях, вызываемых в изоляторах». Посылая Гельмгольцу эту работу, Герц писал:

«Я не мог не послать вам этой работы, так как в ней излагается предмет, к рассмотрению которого Вы меня побудили несколько лет назад. Я постоянно имел в виду эту задачу и, наконец, нашёл путь к её разрешению, который должен был дать ясный результат. Вероятно, я не ошибаюсь, считая, что настоящие опыты достаточно убедительны. Я думаю, что применённые здесь электрические колебания могут быть весьма полезны для элект-

¹ «Из предистории радио», стр. 113.

² Там же, стр. 114.

³ Там же, стр. 115.

тродинамики незамкнутых токов. Я уже успел сделать несколько дальнейших шагов»¹.

Гельмгольц немедленно ответил: «Рукопись получена. Bravo! В четверг пошлю в печать».

После этого Герц экспериментировал со стоячими волнами в проводах и в воздухе. Результаты получились неожиданными: не подтвердилась ни теория мгновенного действия на расстояние, ни максвелловская теория; получилась скорость, большая, чем скорость в проводе. Неудача опытов Герца объяснялась недостаточностью помещения, в котором экспериментировали с сравнительно длинными волнами. Картина волнового поля получалась усложнённой, и разобрать её было трудно. Надо было переходить к новым условиям эксперимента. Но прежде всего — и это Герц понял совершенно ясно — надо было разработать чёткие теоретические представления.

«Точка зрения, с которой эти опыты истолковывались в имеющихся дотоле работах, была та, которую я принял в результате изучения работ фон Гельмгольца. Г-н фон Гельмгольц различает в этих работах две формы электрической силы — электродинамическую и электростатическую, которым, пока об этом ничего не сказал опыт, должны быть приписаны две разные скорости». Всё это усложняло и запутывало теорию. Герц решил целиком перейти на более простую точку зрения Максвелла, допускающую только одну скорость распространения электромагнитных сил, равную в вакууме скорости света. «Необходимо было поэтому попробовать, нельзя ли исходить из этих значительно более простых допущений максвелловской теории. Попытка удалась. Результаты расчёта изложены в работе «Силы электрических колебаний, рассматриваемые с точки зрения теории Максвелла».

В этой работе (1889) Герц пишет уравнения Максвелла для вакуума в той форме, в которой они теперь пишутся (форма Герца-Хевисайда), а именно

$$1 \quad \begin{cases} A \frac{dL}{dt} = \frac{\partial Z}{\partial y} - \frac{\partial Y}{\partial z} \\ A \frac{dM}{dt} = \frac{dX}{dz} - \frac{dZ}{dx} \\ A \frac{dN}{dt} = \frac{dY}{dx} - \frac{dX}{dy} \end{cases} \quad 2 \quad \begin{cases} A \frac{dX}{dt} = \frac{dM}{dz} - \frac{dN}{dy} \\ A \frac{dY}{dt} = \frac{dN}{dx} - \frac{dL}{dz} \\ A \frac{dL}{dt} = \frac{dL}{dy} - \frac{dM}{dx} \end{cases}$$

Здесь X, Y, Z — компоненты напряжённости электрического поля, L, M, N — магнитного, A — величина, обратная скорости света; система координат левая, частные произведения обозначены, как было принято в то время, прямыми дифференциалами. Далее предполагается, что в начальный момент

$$\frac{dL}{dx} + \frac{dM}{dy} + \frac{dN}{dz} = 0; \quad \frac{dX}{dx} + \frac{dY}{dy} + \frac{dZ}{dz} = 0,$$

и это остаётся справедливым и в последующие моменты времени. Величина энергии выражается суммой

$$\frac{1}{8\pi} \int (X^2 + Y^2 + Z^2) d\tau + \frac{1}{8\pi} \int (L^2 + M^2 + N^2) d\tau.$$

¹ «Из предистории радио», стр. 126.

Герц выводит далее из выражения энергии теорему о движении энергии, показывающую, «что прирост энергии в некотором объёме может рассматриваться как увеличение энергии за счёт притока через её поверхность». Таким образом Герц использует теорию Максвелла в её развитом виде, дополненную замечательными результатами Умова-Пойнтинга.

Герц решает уравнения Максвелла для случая, когда электрическая сила обладает симметрией относительно оси z с помощью вспомогательной функции Π , удовлетворяющей соотношению:

$$A^2 \frac{d^2 \Pi}{dt^2} = \Delta \Pi.$$

Эта функция Π — так называемый вектор Герца. Она может быть представлена для случая вибратора в виде

$$\Pi = El \frac{\sin(mr - nt)}{r},$$

где $m = \frac{\pi}{\lambda}$, $n = \frac{\pi}{T}$, E — заряд вибратора, l — его длина, r — расстояние рассматриваемой точки от центра вибратора. Оказывается, что в этом слу-

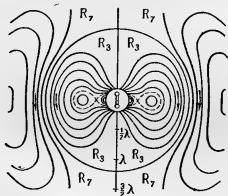


Рис. 104

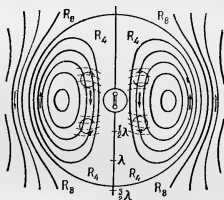


Рис. 105

чае электрическое поле вблизи вибратора совпадает с полем электрического диполя момента $p = El$. Магнитное поле совпадает с полем, создаваемым элементом тока по закону Био-Савара, причём величина элемента тока равна скорости изменения электрического момента. На больших расстояниях от вибратора поле убывает обратно пропорционально первой степени расстояния и, кроме того, зависит от синуса угла, образованного направлением радиуса вектора тока с осью диполя. Герц изобразил наглядно картину силовых линий вибратора для различных моментов времени (см. рис. 104, 105, 106, 107).

Силовые линии то выходят из вибратора, то, сокращаясь, входят в него. «При этом наблюдается замечательный факт, иллюстрируемый, по крайней мере в своей начальной стадии, фигурой 4 (рис. 107.—П. К.) (для $t = \frac{3}{4} T$). Именно, силовые линии, которые больше всего удалены от источника, при своём исчезновении проявляют тенденцию сжиматься и испытывают искривление, в результате которого от каждой из внешних силовых линий отшнуровывается замкнутая на себя силовая линия, кото-

рая начинает самостоятельно двигаться в пространстве, в то время как остаток силовой линии возвращается в вибратор»¹.

В результате такого отпочкования поля вибратор теряет энергию. «Эта потеря энергии соответствует излучению в пространство. По этой причине колебания вибратора должны вскоре прекратиться, если какая-либо посторонняя сила не будет восполнять энергию»².

Отшнуровавшиеся силовые линии всё более и более переходят в чисто поперечную волну и в виде таковой теряются в пространстве. Количество энергии, излученное за полпериода в пространство, равно

$$\frac{1}{3} E^2 l^2 m^3 n T = \frac{\pi^4 E^2 l^2}{3 \lambda^3}.$$

По подсчетам Герца его вибратор терял энергию за полпериода, равную $2400 \text{ г} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{сек}^{-2}$, что при величине полупериода $1,5 \cdot 10^{-8} \text{ сек}$ соответствует мощности в 22 л. с.

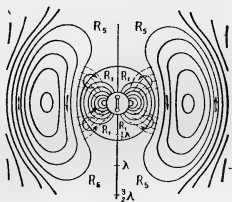


Рис. 106

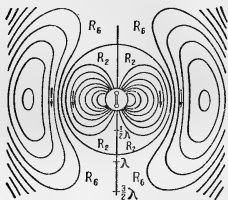


Рис. 107

Теперь, когда Герц разъяснил теоретически вопрос, экспериментирование пошло по новому пути. Длина волны вибратора была уменьшена приблизительно в 10 раз и составляла около 50 см. Повторив с этими волнами прежние опыты, Герц вопреки своему ожиданию установил, «что эти короткие волны распространяются вдоль по проволокам почти с той же скоростью, какую они имеют в воздухе». После этого Герц перешёл к опытам с вогнутыми зеркалами. Результаты этих знаменитых опытов изложены в статье «О лучах электрической силы» (1889). Опыты подобного рода он пытался ставить и раньше, но не добился успеха; теперь с более короткими дециметровыми волнами он «добился значительно лучших успехов, чем рассчитывал». «Мне удалось,— пишет Герц,— получить отчётливые лучи электрической силы и произвести при их помощи все элементарные опыты, которые производятся со световыми и тепловыми лучами»³. Вибратор представлял цилиндрическую медную проволоку диаметром 3 см, длиной 26 см, разрезанную пополам и оканчивающуюся полусферическими поверхностями радиусом 2 см. Длина искрового промежутка составляла 3 мм. Длина вибратора была приблизительно равна половине длине волны генерируемых колебаний. Резонаторы употреблялись двух типов: в виде контура радиуса 7,5 см, концы которого имеют латунный шарик и острие, которое

¹ «Из предистории радио», стр. 172.

² Там же, стр. 173.

³ Там же, стр. 183.

можно устанавливать на некотором расстоянии от шарика с помощью микрометрического винта.

Более удобным оказался другой тип резонатора — открытый прямой вибратор: две прямые проволоки длиной по 50 см каждая и диаметром 5 мм устанавливаются на одной прямой друг против друга на расстоянии 5 см. Их концы двумя параллельными проволоками длиной 15 см и диаметром 1 мм, идущими под прямым углом к ним, соединялись с искровым промежутком (рис. 108).

Зеркало изготовлено из цинкового листа толщиной 0,5 мм и имело высоту 2 м, ширину отверстия 1,2 м, глубину 0,7 м. Вибратор устанавливался в фокусе зеркала. С помощью отражающей стенки можно было наблюдать интерференционное поле: на расстояниях 33, 65 и 98 см от стенки и у самой стенки располагались четыре узла; таким образом длина полуволны составляла 33 см. С этими волнами производились наблюдения на расстояниях до 6—10 м. Было обнаружено, что проводящие экраны образуют тень: дифракции у краёв тени Герцу не удалось наблюдать. Отправные и приёмные зеркала играют роль поляризатора и анализатора: приём волн прекращается, когда оси зеркала взаимно перпендикулярны. Поляризацию Герц наблюдал также с помощью проволоочной решётки, представляющей восьмиугольную рамку в 2 м высоты и 2 м ширины, в которой были натянуты параллельно друг другу медные проволоки в 1 мм толщины на расстоянии 3 см друг от друга. Если оси передаточного и приёмного зеркала параллельны, а решётка помещена так, что её плоскость перпендикулярна лучу, а проволока перпендикулярна направлению фокальных линий (осей), то она не оказывает влияния на приём. Если же решётку повернуть на 90° , так что проволоки будут параллельны осям (электрическому вектору волны), то приём прекратится. Если оси зеркал взаимно перпендикулярны и, следовательно, приёма нет, то, поместив решётку под углом 45° к осям, наблюдаем приём, т. е. «решётка разлагает приходящее колебание на две компоненты и пропускает лишь ту, которая перпендикулярна к направлению её проволок»¹. Герц указывает, что «поляризация луча состоит не в том, что колебания происходят лишь в вертикальной плоскости, но скорее в том, что в вертикальной плоскости возникают электрические колебания, а в горизонтальной — магнитные колебания»². Далее Герц наблюдал законы отражения от проводящей стенки и показал, что законы оптики при этом выполняются. Для исследования преломления Герц изготовил асфальтовую призму, длина стороны сечения которой составляла 1,2 м, а преломляющий угол около 30° . Высота треугольного сечения призмы была 1,5 м, и призма весила 1,2 т. Поэтому она делалась составной из трёх частей высотой 0,5 м каждая. Наименьшее отклонение для такой

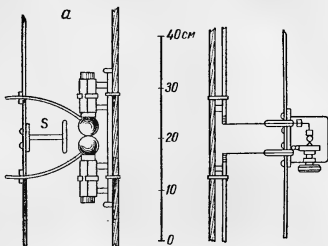


Рис. 108

¹ «Из предистории радио», стр. 187.

² Там же, стр. 188.

призмы составило около 22° , что соответствовало показателю преломления 1,69 (оптический показатель преломления лежит между 1,5 и 1,6).

«Исследованное нами явление,— заключает Герц,— мы называли лучами электрической силы. Пожалуй, их можно было бы назвать световыми лучами с очень большой длиной волны. По крайней мере мне представляется весьма вероятным, что описанные опыты доказывают идентичность света, тепловых лучей и электродинамического волнового движения. Я думаю, что теперь смело можно использовать все преимущества, которые допущение этой идентичности даёт нам как для оптики, так и для учения об электричестве»¹.

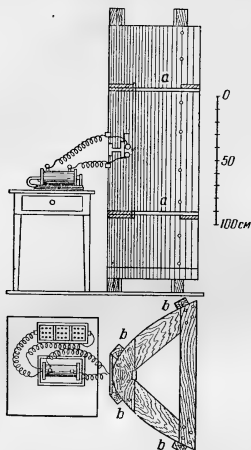


Рис. 109

Так одержала победу электромагнитная теория света. Опытами Герца, как указывает он сам, «впервые было дано доказательство распространению с конечной скоростью силы, которая считалась действующей на расстояние мгновенно. Этот факт составляет философское и вместе с тем в известном смысле важнейшее достижение опытов. В этом доказательстве содержалось познание того, что *электрические силы могут отделяться от весомых тел и существовать далее самостоятельно как состояния или изменения пространства* (курсив мой.— П. К.). Наряду с этим познанием специальные черты отдельных опытов доказывают нам, что этот особый тип распространения электрической силы обнаруживает самую близкую аналогию, если не полное совпадение с распространением светового дви-

жения. Тем самым гипотеза о том, что свет является электрическим явлением, становится в высшей степени вероятной».

Мы помним, что Герц начинал свои исследования под влиянием компромиссной теории Гельмгольца. Но исследования привели его к теории Фарадея-Максвелла, «которая может с той же уверенностью утверждать возможность открытого здесь класса явлений, с какой прочие теории электричества принуждены были эту возможность отрицать».

Хотя максвелловская теория и превосходила другие теории «богатством связей, которые она допускала между явлениями», всё же она не могла вытеснить противостоящие ей теории, «так как,— указывает Герц,— она могла ссылаться лишь на вероятность своих конечных результатов, а не на достоверность своих предпосылок. Основные гипотезы теории Максвелла противоречили обычным воззрениям и не могли опереться на достоверные опыты как на доказательство. В этой естественной связи,— заканчивает Герц,— мы не можем охарактеризовать цель и результаты наших опытов лучше, чем если мы скажем:

¹ «Из предистории радио», стр. 190.

Целью этих опытов была проверка основных гипотез теории Фарадея-Максвелла, а результат опытов есть подтверждение основных гипотез этой теории¹.

Открытия Герца вызвали большой резонанс. Одним из первых откликнулся на весть о победе Герца Александр Григорьевич Столетов, много сделавший для укрепления и развития теории Максвелла. Ещё в 1876 г. он начал эксперименты по определению электромагнитной постоянной. Докладывая о своих экспериментах на VI съезде русских естествоиспытателей и врачей 29 декабря 1879 г., он указывал «на важное значение этой постоянной, которая, по Максвеллу, выражает скорость распространения

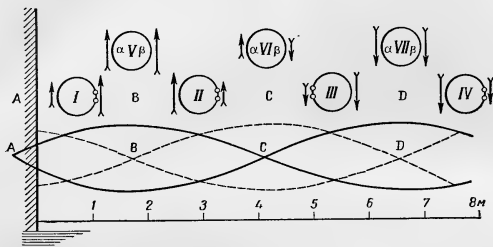


Рис. 110. Стоячие электромагнитные волны (по Герцу).

электромагнитных пертурбаций в среде (воздуха) и по всей вероятности тождественна со скоростью световых волн для той же среды². Через два года, в 1881 г., он предлагал на Международном конгрессе электриков, чтобы Международная комиссия занялась «определением отношения электромагнитных и электростатических единиц, используя для этого все ресурсы современной науки»³, указывая на важность этого вопроса для науки, ибо он проливает свет на связь между электрическими и световыми явлениями. Получив известие о результатах Герца, Столетов выступил на VIII съезде естествоиспытателей и врачей в Петербурге 8 января 1890 г. с блестящей речью «Эфир и электричество». Указав в этой речи на основные выводы электромагнитной теории света, в частности на совпадение скоростей электрической и световой волны в одной и той же среде при одной и той же длине волны, Столетов говорил:

«Эти результаты поразительны. Максвелл нашёл или предсказал их путём теории. До последнего времени никто не мерил прямым опытом скоростей электрической волны, о них заключали по цифрам диэлектрического коэффициента, никто не наблюдал самой передачи электрического процесса волной через непроводящую среду. Оставалось проверить предсказания теории. Эта-то важная победа науки достигнута блестящими опытами Герца в 1888 и 1889 гг.»⁴.

¹ «Из предистории радио», стр. 124.

² А. Г. Столетов, Собр. соч., т. I, Гостехиздат, 1948, стр. 175.

³ Там же, стр. 358.

⁴ Там же, стр. 250—251.

Описав сущность опытов Герца, Столетов подходит к формулировке проблем, выдвинутых на очередь успехами электромагнитной теории света. Таковы проблемы электромагнитной природы молекулярного излучения и структура эфира. Далее Столетов задаёт глубокий вопрос: «Нет ли в спектре Солнца лучей с большой длиной волны, вроде герцевых лучей? Весьма возможно, что есть, что солнце шлёт к нам лучи, лежащие далеко за пределами инфракрасного спектра, не производящие заметного нагревания, но способные действовать электромагнитно»¹. На вопрос Столетова ответила наука наших дней, подтвердив его догадку; радиоизлучение Солнца является одной из проблем молодой науки — радиоастрономии.

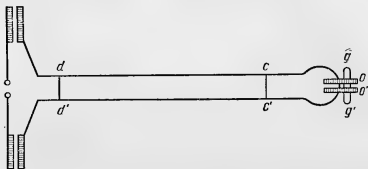


Рис. 111. Схема Лехера для определения скорости распространения электрических волн в проводах

В библиотеке П. Н. Лебедева, находящейся на физическом факультете МГУ, имеется оттиск речи Столетова «Эфир и электричество» с надписью, сделанной рукой Столетова: «Новейшему от древнейшего в России пропагатора герцологии». Таким образом, Столетов считал себя древнейшим в России распространителем идеи электромагнитной теории света, которую он после опытов Герца стал называть «герцологией» или «герцовщиной», отмечая тем самым решающую роль опытов Герца в обосновании этой теории. И если до опытов Герца максвелловскую теорию можно было замалчивать или третировать, то теперь о ней надо было говорить.

В университетах стали читаться курсы электромагнитной теории Максвелла. Появились переводы «Трактата» на французский и немецкий язык, появились и монографии по теории Максвелла. Таковы «Лекции по максвелловской теории электричества и света» Больцмана, первая часть которых вышла в 1891 г., вторая в 1893 г., книга Феппля «Введение в максвелловскую теорию электричества» (1894), которая после переработки её Абрагамом сделалась распространённым учебником по теории электромагнитного поля, книга Друде «Физика эфира на электромагнитной основе» (1894), курс Кона «Электромагнитное поле» (1900) и ряд других книг, излагающих и развивающих теорию Максвелла. Учение об электромагнитном поле было создано.

П. Н. Лебедев. Новая отрасль физической науки потребовала и новых людей, способных разрабатывать её проблемы. К числу таких учёных нового типа принадлежал великий русский физик Петр Николаевич Лебедев, внесший после смерти Герца (Герц умер 1 января 1894 г.) наиболее значительный вклад в науку об электромагнитном поле.

Лебедев родился 8 марта 1866 г. в Москве в семье коммерсанта. Учась в реальном училище, Лебедев увлёкся техникой и, несмотря на противодей-

¹ А. Г. Столетов, Собр. соч., т. II, стр. 256.

ствие отца, отказался от коммерческой карьеры и поступил в Высшее технологическое училище. Его учителями по физике были ученики Столетова П. А. Зилов и В. С. Щегляев. Вскоре Лебедев понял, что его истинное призвание не техника, а физика и, не окончив училища, уезжает в Германию для получения университетского образования (путь в русские университеты для него, не окончившего классическую гимназию, был закрыт).

Лебедев приехал в Страсбург, где директором физического института был известный физик Август Кундт (1839—1894). Это было в 1887 г., в тот год, когда Герц начал свои знаменитые исследования. Нельзя не отметить некоторой общности в судьбе обоих великих учёных. И тот и другой не пожелали пойти по дорогам своих отцов, и тот и другой одинаково начинали с техники и



П. Н. Лебедев

от техники перешли к физике. Эта общность судеб напоминает нам о той роли, которую техника приобретала в жизни общества, и о возросшем значении физики для развития техники. Лебедев, как и до него Герц, понял всё значение техники в современной жизни, а потом и значение физики как основы техники и научного мировоззрения.

Итак, Лебедев очутился у Кундта. Что представлял собой этот известный учёный, к которому Лебедев относился с уважением и благодарностью?

Кундт был учеником выдающегося экспериментатора Густава Магнуса (1802—1870), который, как известно, был инициатором в организации учебных физических лабораторий и создал в 40-х годах первую такую лабораторию у себя на квартире. В этой лаборатории работал и Кундт.

Впоследствии сам Кундт стал выдающимся организатором физических лабораторий и создателем первоклассного физического института в Страсбурге.

«Создание Страсбургского института,— писал Лебедев в 1894 г. в некрологе, посвящённом Кундту,— который вот уже пятнадцать лет служит прототипом физических институтов, аудиторий и лабораторий всех стран, принадлежит к числу крупнейших научных заслуг Кундта: он впервые во всей полноте выяснил те наивыгоднейшие внешние условия, при которых надо учить и работать современному физику»¹.

В этом и заключалась главная заслуга Кундта в развитии физики, позволившая ему, в сущности рядовому учёному, сгруппировать вокруг себя плеяду блестящих физиков. Достаточно назвать имена таких выдающихся русских учёных, как Лебедев, Голицын, Гольдгаммер, Михельсон, Ульянин, Коновалов и ряд других. Особенно большую роль играл в обучении физиков организованный Кундтом практикум и коллоквиум, в котором участвовали физики с разных концов земного шара. Из всей этой плеяды будущих знаменитых учёных выделялся Лебедев, которому Кундт даже по-

¹ П. Н. Лебедев, Собр. соч., М., 1913, стр. 243.



Август Кундт

святил шуточное стихотворение на тему об обилии идей, рождающихся в голове Лебедева.

Несомненно, что научная атмосфера, царившая в Страсбурге, оказала благотворное влияние на формирование молодого учёного и помогла развиться его яркому и самобытному дарованию. Лебедев вынашивал с во и идеи, над осуществлением которых работал всю жизнь, но учился у Кундта формам организации коллективной научной работы, и этот опыт помог ему в деле создания русской физической школы Лебедева.

В 1891 г. Лебедев защитил в Страсбурге докторскую диссертацию «Об изменении диэлектрических постоянных паров и о теории диэлектриков Москотти-Клаузиуса». Эта работа явилась важным этапом в развитии электрической теории строения материи. В том же году появилась (уже в Москве) работа Лебедева

«Об отталкивательной силе лучеиспускающих тел», открывшая цикл его знаменитых работ по изучению давления света.

Тепло встреченный А. Г. Столетовым по приезде в Москву, Лебедев с неиссякаемой творческой энергией берётся за научную и учебную работу в Московском университете, в котором проработал 20 лет до своего вынужденного ухода в 1911 г., за год до преждевременной смерти.

В 1894 г. Лебедев получает русскую степень доктора за работу «Экспериментальное исследование пондеромоторного действия волн на резонаторы» (1-я часть). Всё исследование Лебедевым было закончено в 1897 г. Эта работа важна в двух отношениях: во-первых, как одна из первых попыток изучения природы молекулярных взаимодействий, исходя из представления о сложной электромагнитной природе молекул, и, во-вторых, как первое систематическое исследование механических свойств волнового поля.

В 1894 г. умер Герц. В это время в Москве происходил IX съезд русских естествоиспытателей и врачей, в котором приняли участие 2180 человек. А. Г. Столетов устроил параллельно утренним заседаниям съезда вечерние заседания в новой физической аудитории «для обзора и демонстрации новостей физики». Аудитория была переполнена. Здесь Лебедев дал мастерский обзор исследований Герца с воспроизведением его опытов.

О докладе Лебедева Столетов писал Михельсону: «Особенно отличился Лебедев: его длинная лекция по опытам Герца была мастерски сказана и обставлена».

Здесь у Лебедева и возникла мысль не только повторить, но и продолжить опыты Герца. В начале 1895 г. появилась его классическая работа «О двойном преломлении лучей электрической силы».

Само название показывало, в чём состояло продолжение опытов Герца, осуществлённое Лебедевым. Оно заключалось в том, что «явилась возможность распространить основные опыты Герца на кристаллические среды и пополнить их исследованием двойного преломления в кристаллах»¹.

¹ П. Н. Лебедев, Собр. соч., стр. 37.

Но не только в этом состояло новое, внесённое в учение об электромагнитных волнах Лебедевым. Новое заключалось в том, что Лебедев продвинулся дальше в решении задачи доказать тождество световых и электромагнитных волн. Герц указывал, что его опыты сделали «вероятной» гипотезу об электромагнитной природе света. «Строгое доказательство этой гипотезы заведомо может быть дано лишь опытами со светом».

В цитированной нами речи «Эфир и электричество» Столетов говорил об этой же проблеме следующим образом: «Мы допустили, что электрический луч Максвелла и Герца тождествен с лучом световым. Нельзя



Рис. 112. Страсбургский физический институт

ли доказать это? Такое доказательство мы получили бы, если бы удалось, уменьшая период колебания вибратора, дать электрической волне все свойства световой — сделать её способной вызывать ощущение света.

Уменьшая размеры вибратора, мы будем приближаться к этой цели; но чтобы её достигнуть, пришлось бы обратить вибратор в одну молекулу¹.

Итак, задача сближения области искусственных электромагнитных излучений с естественными молекулярно-атомными излучениями Столетовым сформулирована. Лебедев смело пошёл навстречу области неуправляемых молекулярных колебаний.

В 1894 г. Риги удалось получить волны в 7,5 см длины. Лебедев уменьшил границу до 0,6 см, поставив не превзойдённый никем рекорд получения коротких электромагнитных волн.

Излучатель Лебедева представлял собой два маленьких платиновых цилиндрика P_1 и P_2 (длина цилиндров составляла 1,3 мм, диаметр 0,5 мм), впаянных в стеклянные трубки G_1 и G_2 . Заряд от индуктора к цилиндрикам подводился с помощью проволок D_1 и D_2 , отделённых от цилиндров промежутками. Низкочастотный разряд индуктора отфильтровывался с по-

¹ А. Г. Столетов, Собр. соч., т. II, стр. 256.

мощью конденсатора C и водяного сопротивления W . Излучатель помещался в фокусе цилиндрического зеркала высотой 20 мм, отверстием 12 мм, фокусным расстоянием 6 мм. Поучительно сравнить эти размеры с зеркалами Герца.

Для детектирования колебаний Лебедев использовал термоэлектрический метод, предложенный в 1893 г. Клеменчишем. В фокусе второго цилиндрического зеркала таких же размеров помещены два прямолинейных резонатора R_1 и R_2 , каждый длиной 3 мм. К ним были припаяны петельки из двух проволок — железной и константовой, нагревание термоэлемента отмечалось током в чувствительном гальванометре. Оба зеркала монтировались на спектрометре, первичное зеркало с вертикальной осью помещалось на коллиматоре, вторичное зеркало помещалось на месте трубы и могло вращаться по кругу, ось его также могла поворачиваться вокруг горизонтальной оси наподобие николя. Расстояние между зеркалами было около 10 см.

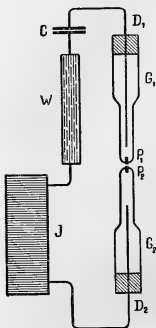


Рис. 113

На этой установке Лебедев прежде всего повторил основные опыты Герца. Поляризация была показана с помощью решётки из 20 тонких проволок размером 2×2 см. Для демонстрации интерференции и измерения длины волны Лебедев использовал метод, предложенный в 1890 г. Больцманом, состоящий в том, что «волны от первого параболического зеркала посылались на второе при помощи двух плоских зеркал, которые образовывали по примеру френелевских зеркал тупой

угол и плоскости которых отстояли друг от друга на расстояние, во много раз превышающее половину длины волны». Пользуясь этим методом, Лебедев обнаружил максимум при разности ходов 0; 0,2—0,3 см, затем 0,5—0,6 см. Это указывало, что длина волны равнялась 0,6 см.

Далее демонстрировалась прозрачность для этих волн изоляторов и непрозрачность проводников. Законы отражения проверялись с помощью плоского металлического зеркала. Преломление демонстрировалось с эбонитовой призмой высотой 1,8 см, шириной 1,2 см, с преломляющим углом 45° , весом 2 г (опять-таки сравнить с данными Герца!). Угол отражения оказался 30° , откуда n для эбонита 1,6, в то время как корни, квадратные из диэлектрической постоянной, колеблются в пределах 1,4—1,8. Лебедев делает отсюда вывод, «что в пределах погрешностей наблюдения закон Максвелла имеет место».

«Размеры описанных аппаратов, — пишет Лебедев, — позволили распространить основные оптические опыты и на кристаллические среды». В качестве такой среды Лебедев использовал естественную ромбическую серу. Для оси наибольшей электрической постоянной Лебедев получил показатель преломления $n_g = 2,2$, для оси наименьшей диэлектрической постоянной $n_k = 2,0$. По измерениям Больцмана $\sqrt{D_g} = \sqrt{4,77} = 2,18$;

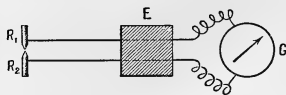


Рис. 114



А. С. Попов

А. С. Попов родился в 1859 г. на Урале в семье священника. Он, как и Герц и Лебедев, не пошёл по дороге отца, духовную семинарию не закончил, а по окончании четырёх общеобразовательных классов в 1877 г. подал заявление на физико-математический факультет Петербургского университета.

При тогдашней системе народного образования в России в университет можно было поступить лишь с аттестатом зрелости, выдаваемым окончившим классическую гимназию. Лица, окончившие шесть классов духовной семинарии, допускались к экзаменам на аттестат зрелости, и в этом отношении Попов оказался счастливее Лебедева, не получившего аттестата (в реальных училищах не проходила латынь — один из главных предметов аттестата). Много и упорно занимаясь естественными науками самостоятельно, он блестяще сдал

экзамен за гимназию и был принят в Петербургский университет. Учителями Попова были Д. И. Менделеев, П. Л. Чебышев, Ф. Ф. Петрушевский. Физику он изучал по тому «Курсу наблюдательной физики», который так характерен для эмпирического направления Петрушевского.

Большое влияние на Попова оказал кружок молодых физиков, группировавшихся в физической лаборатории вокруг лаборанта В. В. Лермантова, который хотя и числился лаборантом, но, по словам М. А. Шателена, по существу был «главным руководителем лаборатории, дававшим тон всей её жизни». Здесь А. С. Попов получил навыки первоклассного экспериментатора, приобрёл вкус и любовь к электротехнике. Он принимал активное участие в заседаниях только что организованного в 1880 г. VI (электротехнического) отделения Русского технического общества, работал в качестве дежурного электрика в обществе «Электротехник», ассистировал в университете.

Университет Попов окончил со степенью кандидата в 1882 г. и был оставлен для подготовки к профессорскому званию. Материальная необеспеченность вынудила его искать заработок. Просуществовав некоторое время уроками, Попов вскоре принял приглашение занять место преподавателя Минного офицерского класса в Кронштадте. Здесь он проработал 17 лет, до 1901 г., когда получил приглашение на кафедру физики в Электротехническом институте, где и родилось его великое открытие.

Когда Попов получил известие об опытах Герца, он немедленно воспроизвёл их в Минном классе с оригинальной усовершенствованной аппаратурой. Им был прочитан в 1889 г. цикл лекций на тему «Новейшие исследования о соотношении между световыми и электрическими явлениями». В марте 1890 г. он прочитал в Морском музее в Петербурге лекцию «Об электрических колебаниях». Как вспоминал его тогдашний ассистент, впоследствии проф. Н. Н. Георгиевский, «Александр Степанович всегда стремился к увеличению чувствительности приёмной части приборов и уменьшению

длины волны герцовской аппаратуры»¹. Его не удовлетворял метод Герца, в котором индикатором колебаний была маленькая искра, рассматриваемая в лупу, он искал новый, практичный и чувствительный детектор колебаний. Так им был сконструирован специальный механический радиометр, воздушный термометр, но все эти индикаторы мало удовлетворяли Попова. Несомненно, что в это время он думал о практическом приложении волн Герца. Поэтому он с особой остротой воспринимал всё новое в области детектирования электрических колебаний. В 1890 г. появилось сообщение французского физика Эдуарда Бранли о наблюдаемом им воздействии электрического разряда на проводимость металлических порошков (железа, алюминия, сурьмы, кадмия, цинка, висмута и т. д.). Бранли писал:

«Если сделать контур, состоящий из элемента Даниэля, чувствительного гальванометра, металлического проводника и эбонитовой пластинки с нанесённой медью или трубочки с опилками, то большей частью проходит лишь ничтожный ток. Однако сопротивление резко уменьшается, что видно по сильному отклонению гальванометра, если вблизи контура произвести один или несколько разрядов»².

В 1894 г. Бранли описал более подробно это явление в статье «О проводимости несплошных проводящих веществ». Однако ни в первом, ни во втором сообщении не подчёркивается и даже не указывается роль электрических колебательных процессов в изменении проводимости, и вопрос о применении этого явления в качестве индикатора колебаний даже не ставится.

В качестве индикатора колебаний трубка с опилками была применена О. Лоджем в 1894 г. и названа им «когерером». «Этот прибор, который я называю когерером, удивительно чувствителен как детектор герцовских волн», — писал Лодж. Сообщение Лоджа произвело на Попова огромное впечатление. Его сотрудник П. Н. Рыбкин писал по этому поводу:

«Я до сих пор помню, с каким волнением показывал А. С. мне номер журнала «The Electrician», в котором была помещена статья Лоджа, где он описывал свои знаменитые опыты по применению открытия Бранли к устройству когерера для обнаруживания при помощи его электрических колебаний».

Легко понять и волнение и дальнейшие творческие искания Попова: наметился путь решения большой задачи. К весне 1895 г. первый в мире приёмник электрических колебаний был создан. 25 апреля (7 мая) 1895 г. на 151-м (201-м) заседании Физического отделения Русского физико-химического общества А. С. Попов сделал доклад «Об отношении металлических порошков к электрическим колебаниям». Содержание доклада, дополнен-

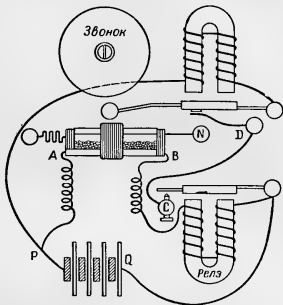


Рис. 115. Схема устройства «грозоотметчика» А. С. Попова

¹ М. А. Шателен, Русские электротехники, стр. 291.

² «Из предистории радио», стр. 353.

ное протоколами испытаний по регистрации атмосферных разрядов, произведённых Г. А. Лобачевским с прибором Попова в Лесном институте летом 1895 г., составило предмет статьи Попова «Прибор для обнаружения и регистрирования электрических колебаний А. С. Попова», представленный в декабре 1895 г. в журнале Русского физико-химического общества и появившийся в первом номере этого журнала за 1896 г. Приёмник Попова описан им в этой статье следующим образом:

«Трубка с опилками подвешена горизонтально между зажимами *M* и *N* на лёгкой часовой пружине, которая для большей эластичности согнута со стороны одного зажима зигзагом. Над трубкой расположен звонок так, чтобы при своём действии он мог давать лёгкие удары молоточком посередине трубки, защищённой от разбивания резиновым кольцом. Удобнее всего трубку и звонок укрепить на общей вертикальной дощечке. Реле может быть помещено как угодно. Действует прибор следующим образом. Ток батареи 4—5 в постоянно циркулирует от зажима *P* к платиновой пластинке *A*, далее через порошок, содержащийся в трубке, к другой пластинке *B* и по обмотке электромагнита реле обратно к батарее. Сила этого тока недостаточна для притягивания якоря реле, но если трубка *AB* подвергается действию электрического колебания, то сопротивление мгновенно уменьшится и ток увеличится настолько, что якорь реле притянется. В этот момент цепь, идущая от батареи к звонку, прерванная в точке *C*, замкнётся и звонок начнёт действовать, но тотчас же сотрясённая трубка опять уменьшит её проводимость, и реле разомкнёт цепь звонка»¹.

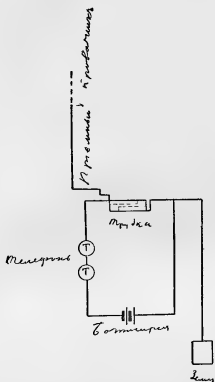


Рис. 116. Собственный рисунок А. С. Попова

Из опытов, приведённых Поповым для испытания чувствительности приёмника, особенно важны два первых:

«1) Прибор отвечает на разряды электрофора через большую аудиторию, если параллельно направлению разряда провести от точки *A* или *B* проволоку длиной около 1 метра, для увеличения энергии, достигающей опилок.

2) В соединении с вертикальной проволокой длиной в 2,5 метра прибор отвечал на открытом воздухе колебаниям, произведённым большим герцевым сиротом (квадратные листы 40 сантиметров в стороне) с искрой в масле, на расстоянии 30 сажень. Из выделенных нами мест статьи Попова ясно видно, что в 1895 г. он принимал радиоволны на расстоянии 60 м на приёмную антенну своего приёмника. В той же статье Попов так характеризует область применения его прибора:

«Прибор, обладающий такой чувствительностью, может служить для различных лекционных опытов с электрическими колебаниями и, будучи закрыт металлическим футляром, с удобством может быть приспособлен к опытам с электрическими лучами...

¹ «Изобретение радио А. С. Поповым», АН СССР, 1945, стр. 60.

Другое применение прибора, которое может дать более интересные результаты, будет его способность отмечать электрические колебания, происходящие в проводнике, связанном с точкой *A* или *B* (на схеме), в том случае, когда этот проводник подвергается действию электромагнитных пертурбаций, происходящих в атмосфере. Для этого достаточно прибор, *защищённый от всяких других действий, связать с воздушным проводом, проложенным вдали от телеграфов и телефонов, или же со стержнем громоотвода*¹ (подчёркнуто всюду мной. — П. К.). Перед нами ясная картина *экранированного приёмника*, регистрирующего электромагнитные сигналы, поступающие в *приёмную антенну*. И вполне закономерным является заключительный вывод автора:

«В заключение могу выразить надежду, что мой прибор, при дальнейшем усовершенствовании его, *может быть применён к передаче сигналов на расстоянии при помощи быстрых электрических колебаний*, как только будет найден источник таких колебаний, обладающий достаточной энергией»².

Таким образом, А. С. Попов не только ясно представляет возможность радиотелеграфии, но и указывает путь, которым может быть решена эта задача: получение мощных передатчиков сигналов.

12 (24) марта 1896 г. А. С. Попов продемонстрировал первую в мире радиопередачу и приём осмысленного текста из одного здания в другое на расстоянии около 250 м. Из физической аудитории Петербургского университета в физическую, где происходило заседание Физического отделения Физико-химического общества, была передана радиogramма: «Генрих Герц». Акад. В. Ф. Миткевич так вспоминает об этом историческом дне: «Памятное заседание происходило днём в воскресенье в большой аудитории старой физической лаборатории во дворе Петербургского университета. В этой скромной рядовой аудитории была установлена радиоприёмная станция с аппаратом Морзе.

На расстоянии 250 м в новом здании химической лаборатории университета находилась отправительная станция, питавшаяся катушкой Румкорфа. Около неё дежурил ближайший помощник А. С. Попова — П. Н. Рыбкин.

Среди присутствующих на заседании были представители Морского ведомства и виднейшие русские физики-электрики того времени: О. Д. Хвольсон, И. И. Боргман, А. И. Садовский, В. К. Лебединский, М. А. Шателен, А. Л. Гершун, Г. А. Любославский, Н. Н. Георгиевский, Н. А. Смирнов, В. В. Скобельцын, Н. А. Булгаков, Н. Г. Егоров

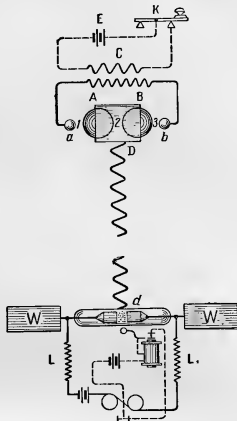


Рис. 117. Схема передатчика и приёмника Г. Маркони

¹ «Изобретение радио А. С. Поповым», АН СССР, 1945, стр. 61.

² Там же, стр. 64.

и Ф. Ф. Петрушевский. Перед заседанием все собравшиеся ознакомились с устройством радиоприёмной станции, а затем, усевшись на студенческих скамьях, с волнением приготовились к опыту передачи телеграммы без проводов.

Заседание открыл старейший физик Ф. Ф. Петрушевский, предоставив слово А. С. Попову. После 30—40-минутного доклада изобретатель послал кого-то из присутствовавшей молодёжи на отправительную станцию к П. Н. Рыбкину с указанием начать радиопередачу.

Атмосфера в физической лаборатории стала напряжённой. Все собравшиеся сознавали, что присутствуют при демонстрации изобретения, будущее которого уже тогда представлялось величайшим. Волнение участни-

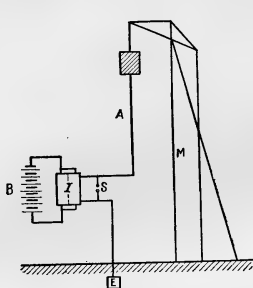


Рис. 118. Схема передаточной станции Маркони

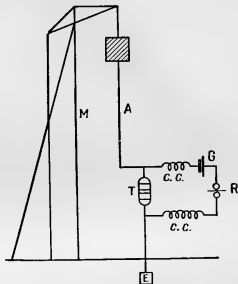


Рис. 118а. Схема приёмной станции Маркони

ков заседания увеличилось ещё тем, что текст первой в мире телеграммы был известен только Попову и Рыбкину. Сохраняя внешнее спокойствие, изобретатель с улыбкой наблюдал за тем, с каким напряжённым вниманием все присутствующие следили за медленно появляющимися на ленте приёмника Морзе буквами, которые Петрушевский повторял мелом на большой аудиторной доске»¹.

Процесс передачи более детально описывает О. Д. Хвольсон.

«Передача происходила таким образом, что буквы передавались по алфавиту Морзе и притом знаки были ясно слышны. У доски стоял председатель Физического общества проф. Ф. Ф. Петрушевский, имея в руках бумагу с ключом к алфавиту Морзе и кусок мела. После каждого передаваемого знака он смотрел в бумагу и затем записывал на доске соответствующую букву. Постепенно на доске получились слова Heinrich Hertz и притом латинскими буквами. Трудно описать восторг многочисленных присутствующих и овации А. С. Попову, когда эти два слова были написаны»².

Так начало свою жизнь одно из величайших изобретений человеческого гения. Великий изобретатель увековечил в первой радиограмме того,

¹ А. И. Берг, М. И. Радовский, Изобретатель радио А. С. Попов, Госэнергоиздат, 1950, стр. 70.

² Там же, стр. 69.

кто первым в мире наблюдал электромагнитные волны. А. С. Попов был первым человеком, заставившим эти волны служить человеку.

Попов находился на службе Морского военного ведомства и имел инструкции не разглашать своего открытия. Поэтому запись об историческом дне согласно его указанию была сделана в протоколах общества в такой форме: «А. С. Попов показывает приборы для лекционного демонстрирования опытов Герца. Описание их помещено уже в ЖРФХО» (ЖРФХО, 1896, т. XXVIII, стр. 124). В июле того же 1896 г. появилось сообщение об опытах Маркони. Ознакомившись с публикацией о приборе Маркони, Попов



Рис. 119. Маркони у своей приёмопередающей станции

констатировал, что всё, что было им описано, содержится и в приборе Маркони. Однако Маркони сумел привлечь капитал к новому делу, провести широкий и многосторонний эксперимент, и тем самым способствовал развитию новой отрасли техники—радиотехники.

Нам остаётся немного прибавить к истории первых шагов радио.

Большую роль в исследовании высокочастотных колебаний сыграли работы Николо Тесла (1856—1943), который сконструировал своеобразный мощный генератор высокочастотных токов (трансформатор Тесла). С помощью этого генератора Тесла производил эффектные опыты с высокочастотным разрядом, демонстрировал безвредность их для организма.

Мы воспроизводим фотографию, где изображён Тесла в своей лаборатории. Эту фотографию преподнёс Тесла одному из пионеров радиотехники А. Слаби (рис. 120). Тесла предполагал, что мощными генераторами можно изменять электрическое состояние Земли и таким образом передавать «осмысленные сигналы», а может быть и энергию на любое расстояние без помощи проводов. Он предполагал использовать для этой цели принцип резонанса, на котором основано и действие его трансформатора.



Николо Тесла

Один из проектов Тесла изображён на рисунке 121.

Однако опыты Тесла при всей их эффективности не принесли желаемых результатов, а скромный «грозоотметчик» Попова продолжал неуклонно расширять область своего применения.

Уже в 1897 г. радио А. С. Попова участвовало в спасательных работах по снятию с камней броненосца «Генерал-адмирал Апраксин». Радиосвязь между о. Гогланд и береговым посёлком Котка осуществлялась на расстоянии 41 версты. В процессе спасательных работ была передана радиограмма ледоколу «Ермак», участвовавшему в этих работах 24/I, в 2 часа 15 мин. дня: «Около Лавенсара оторвало льдину с рыбаками. Окажите помощь». С Гогланда ответили: 25/I 4 часа 40 мин. дня. «Ермак ушёл за рыбаками. Рыбкин».

Рыбаки были спасены. Так началась работа радио по спасению людей.

29 декабря 1899 г. А. С. Попов прочитал на I Всероссийском электротехническом съезде доклад «Телеграфирование без проводов». Председательствующий проф. Н. Г. Егоров (цитирую протокольную запись) «ука-

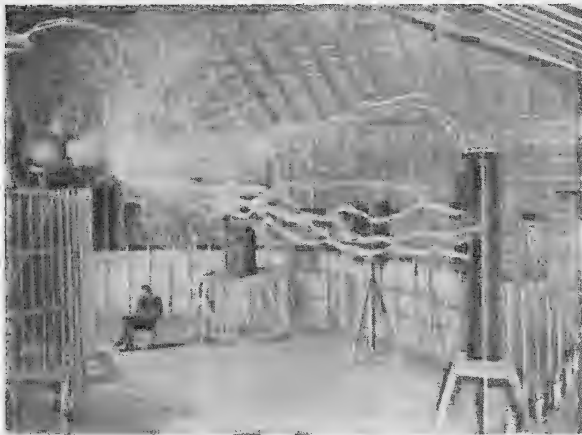


Рис. 120. Н. Тесла в своей лаборатории

зал как на редкое явление на то, что А. С. Попов, который своё открытие сделал ранее открытия Маркони, между тем как большая доля известности досталась этому последнему, не потерял спокойствия духа и, сохраняя полную самоуверенность, продолжает самостоятельно непрерывно расширять область своих исследований и опытов, которые, как видно из прочитанного доклада, уже привели его к практическому пользованию телефонами.

Несомненно, телефон позволит увеличить расстояние для телеграфирования без проводов, а упростив и удешевив манипуляции телеграфирования, он позволит и скромному коммерческому судну воспользоваться драгоценными качествами герцевых волн¹.



Рис. 121. Установка Тесла для передачи энергии токов высокой частоты на расстояние

Великий изобретатель умер 31 декабря 1905 г. от кровоизлияния в мозг на посту директора Электротехнического института. Гибель ускорила петербургский градоначальник, потребовавший от Попова решительных мер по прекращению студенческих «беспорядков». А. С. Попов отказался. Как рассказывает дочь Попова Р. А. Попова, он вернулся от начальства в тяжёлом состоянии: «Даже мы, дети, заметили что-то неладное. Он был бледен, губы его дрожали». Общественность оценила смерть Попова как новую жертву «современных невыносимо тяжёлых условий в России».

Эти слова были написаны в том самом журнале, где ровно за 10 лет до этого была помещена статья А. С. Попова об открытии радио.

Открытием Попова завершилась борьба за теорию электромагнитного поля. Предсказанные Фарадеем и Максвеллом электромагнитные волны вышли из стен лаборатории на арену жизни. Реальность поля была доказана практикой — этим высшим критерием истины. Науке предстояло теперь глубже изучить свойства этой реальности. Важнейшую роль в познании поля сыграло открытие его механических свойств.

¹ «Изобретение радио А. С. Поповым», стр. 135.

**Механические
свойства
электромагнитного
поля.**

Как было сказано выше, Максвелл, широко используя механические модели для раскрытия структуры электромагнитного поля, отражаемой математически его уравнениями, остановился перед механикой. Единственной механической (в понимании Максвелла) величиной, которую он считал применимой и к полю, была энергия. Вывод давления света, основанный на переносе статических натяжений и давлений

и, которую он считал применимой и к полю, была энергия. Вывод давления света, основанный на переносе статических натяжений и давлений



Рис. 122. Одна из первых радиостанций на корабле

на поле электромагнитных волн, по существу был неправомерным. Так его и расценили большинство ведущих физиков того времени.

Из числа русских физиков, не принимавших вывода Максвелла, можно указать на Д. А. Гольдгаммера и Н. Н. Шиллера. Из зарубежных физиков известным противником максвелловского светового давления был В. Томсон.

Конечно, если принять вместе с Максвеллом, что электромагнитные волны, в том числе и световые, могут оказывать механические действия на тела, то тем самым предreshается вопрос о применимости к полю таких механических характеристик, как количество движения (импульс) и далее масса. Мы видели, что Максвелл оперировал с понятием электромагнит-

ного импульса, однако это была только математическая аналогия механического импульса, которой Максвелл не приписывал никакого реального механического содержания, всячески подчёркивая формальный характер этой аналогии.

Глубокое проникновение механики в электродинамику, имевшее своим следствием фундаментальное изменение воззрений на основные механические понятия, связано прежде всего с работами Дж. Дж. Томсона.

В своих воспоминаниях Томсон пишет: «Я родился в Четами — предместье Манчестера — 18 декабря 1856 г.; и время и место были благоприятны, так как период между тем, что было тогда, и сегодняшним днём был более переполнен событиями, чем какой-либо другой период в истории мира» (Томсон писал свои воспоминания в 1936 г., умер он в начале второй мировой войны 30 августа 1940 г.). Коснувшись больших изменений в политической жизни мира, Томсон продолжает: «Но не об этих вещах я буду говорить в своих воспоминаниях. В мою область в большой мере входят изобретения и открытия, сделанные в тот именно период, который вызвал великие изменения в нашей общественной жизни. Когда я был мальчиком, не было велосипедов и автомобилей, не было аэропланов и электрического света, не было телефонов и радио. Не было граммофонов, не было кино и не было бактерий, по крайней мере таких, которые были бы признаны врачами»¹.

В открытиях и изобретениях, о которых говорит Томсон, имеется и его значительный вклад. Он начал с внедрения механики в физику и химию. Его диссертация 1880 г., из которой позднее в 1888 г. выросла книга «Применение динамики к физике и химии», представляет собой дальнейшее приложение метода Лагранжа к задачам физики и химии. Почин в этом направлении принадлежит Максвеллу, применившему в своём «Трактате» уравнения Лагранжа для обоснования электродинамических уравнений проводящих цепей. Но Томсон не ограничился механической аналогией, а пошёл дальше. В 1881 г. в работе «Об электродинамическом и магнитном эффекте, производимом движением назлектризованных тел» он вводит фундаментальное понятие об электромагнитной массе.

Идея этой работы такова. Пусть мы имеем движущуюся заряжённую сферу радиуса a . В состоянии покоя эта сфера была окружена электрическим полем, энергия которого $U_0 = \frac{e^2}{2a}$. При движении сферы со скоростью v возникает магнитное поле $H = \frac{ev \sin \theta}{cR^2}$, энергия которого

$$\int_v \frac{H^2}{8\pi} dv = \frac{1}{3} \frac{e^2 v^2}{ac^3}.$$

Эта энергия прибавляется к обычной кинетической энергии движущегося тела.

$$E = \frac{mv^2}{2} + \frac{1}{3} \frac{e^2 v^2}{ac^3} = \frac{v^2}{2} \left(m + \frac{2}{3} \frac{e^2}{ac^3} \right).$$

Это и приводит к увеличению механической массы тела на величину

$$m_e = \frac{2}{3} \frac{e^2}{ca}.$$

¹ А. К. Тимирязев, Жизнь и труды Дж. Дж. Томсона, журн. «Успехи химии», т. X, вып. 1, 1941, стр. 101.

Эта масса, обусловленная магнитным полем движущегося заряда, и есть электромагнитная масса движущегося заряжённого тела. Это электромагнитная масса или «полевая масса»; она обусловлена полем, окружающим тело, зависит от структуры этого поля.

Но отсюда вытекают важнейшие выводы: электромагнитная масса должна зависеть от скорости движения заряда, от формы заряжённого тела, т. е. именно те выводы, которые были высказаны в XVII в. Декартом.

Продолжая разрабатывать теорию электромагнитного поля, Томсон в 1891 г. пришёл к установлению связи между электромагнитной массой и энергией с точностью до числового множителя, совпадающей с известным соотношением $E = mc^2$, и к установлению важного факта зависимости массы от скорости.

Одновременно Томсон проводил экспериментальные исследования электрических разрядов в газах, приведшие к исключительно важным открытиям в электронной и атомной физике. Все эти работы Томсона были обобщены им в книге «Замечания о современных исследованиях по электричеству и магнетизму, служащих продолжением Трактата по Электричеству и Магнетизму профессора Клерка Максвелла», вышедшей в 1893 г. Это характерное название показывает, что Томсон рассматривал свои исследования как продолжение направления Фарадея и Максвелла. В первой главе этого сочинения Томсон ставит своей целью шире и полнее использовать образ фарадеевских трубок, чем это было сделано Максвеллом. Сам Томсон в предисловии следующим образом характеризует эту главу:

«Первая глава этого сочинения содержит метод исследования электрического поля, который является скорее геометрическим и физическим, чем аналитическим. Я оказался вынужденным остановиться на нём, так как нашёл, что студенты, в особенности те, кто начал изучать предмет после прохождения большого математического курса, имеют сильную склонность к тому, чтобы рассматривать всю теорию Максвелла как материал для решения некоторых дифференциальных уравнений и освобождать себя от всяких попыток представлять мысленную картину физических процессов, соответствующую изучаемым ими явлениям. Я полагаю, что такое положение вещей достойно сожаления, ибо оно тормозит прогресс науки об электричестве и умаляет значение умственной тренировки, необходимой для изучения этой науки.

Прежде всего хотя нет инструмента исследования более могучего, чем математический анализ, который действительно абсолютно необходим во многих разделах электричества, однако аналитическая работа даёт наибольший эффект, когда применяется для развития положений, полученных другими и более физическими методами. Примером таких методов является метод, очень тесно связанный с возникновением и развитием теории Максвелла, а именно, метод «силовых трубок», употреблявшийся Фарадеем. Фарадей интерпретировал все законы электростатики в терминах этих трубок, служивших ему взамен математических символов, и в его руках законы, по которым эти трубки взаимодействуют друг с другом, служили взамен дифференциальных уравнений для таких символов. Очевидно, что метод трубок является физическим, тогда как метод символов и дифференциальных уравнений — аналитический.

Физический метод имеет все преимущества наглядности, вытекающей из использования конкретных величин вместо абстрактных символов для представления состояния электрического поля. Им легко оперировать

и потому он особенно пригоден для быстрого получения основных особенностей проблемы; однако при детальной разработке проблемы аналитический метод необходим.

При исследовании какой-либо из различных областей Электричества мы должны действовать в соответствии с предписанием Бэкона, что наилучшие результаты достигаются тогда, когда исследование начинается Физикой и заканчивается Математикой. Если мы пользуемся физической теорией в сказанном смысле, то мы сперва делаем общий обзор местности, а пользуясь после этого аналитическим методом, находим внизу надёжные пути вдоль направлений, намеченных при обзоре.

Пользование физической теорией помогает выправить тенденцию, — которую, я думаю, не сочтёт необычной каждый, кто имел случай экзаменоваться по Математической Физике, — рассматривать аналитический процесс как современный эквивалент Философской машины Великой Академии в Лягалло и в этой связи рассматривать как нормальный процесс исследования манипуляцию с большим числом символов в надежде, что когда-либо выпадет случайно ценный результат.

Напротив, я полагаю, что дополняющая математическую теорию теория более физического качества сделает изучение электричества более ценным для умственной тренировки студентов. Анализ, несомненно, самая экономная мыслительная машина, когда-либо изобретённая, но я, признаюсь, не думаю, чтобы было необходимо или желательно прибегать к искусственным способам, чтобы предохранить студента от серьёзных размышлений. Часто случается, что требуется более глубокое размышление и получается более яркая идея о существе проблемы при грубом решении её общим методом, чем при сложном решении посредством более современных усовершенствований в Высшем Анализе.

Метод иллюстрации свойств электрического поля, который я даю в первой главе, задуман так, чтобы он вёл непосредственно к отличительной особенности теории Максвелла: изменение поляризации в диэлектрике порождает магнитные действия, аналогичные действиям, производимым токами проводимости. Я не сомневаюсь, что можно было бы придумать другие методы рассмотрения процессов в электрическом поле, находящиеся в согласии с теорией Максвелла; однако вопрос, какой из этих частных методов должен усвоить студент, во многих случаях имеет второстепенное значение при том условии, что он усвоил один из них и приобрёл навыки в рассмотрении проблем с помощью этого метода с возможно более физической точки зрения.

Конечно, справедливо, что эти физические теории должны больше предполагать, чем это допускается аналитическими теориями, что они применяются лишь для иллюстрации. Однако это не важно, если помнить, что объектом таких теорий являются предположения, а не доказательства. Альтернативный эксперимент или строгий Анализ всегда будет окончательным апелляционным судом; удел физических теорий — снабжать случаями для испытания таких судов¹.

Мы привели эту характеристику Томсона ввиду её большого исторического и методического интереса.

Говоря о методе Томсона, следует отметить тесную связь его представлений с представлениями кинетической теории материи. Это обстоятельство кажется на первый взгляд совершенно неожиданным. Непрерывная

¹ J. J. Thomson, *Recent Researches on Electricity and Magnetism*, Oxford, 1893, предисловие.

среда Фарадея-Максвелла обычно противопоставляется зернистой атомной структуре «грубой» материи. Но не случайно, что сам Максвелл был одним из основоположников кинетической теории материи, так же как и то, что Фарадеем были заложены основы будущих электронных представлений. Вопрос о структуре среды, впервые поставленный Ломоносовым, играл огромную роль в представлениях Фарадея и Максвелла.

Томсон предполагает, что структура эфира определяется фарадеевскими трубками, которые или связывают положительные и отрицательные заряды или замкнуты. Рассматривая трубки первого рода, Томсон исходит из идеи



Рис. 122а. Дж. Дж. Томсон в своей лаборатории

дискретности заряда и вводит единичные трубки определённого напряжения на силы:

«Эта сила единичной трубки определяется явлениями электролиза, показывающими, что имеется естественная единица (электричества) и что не существует подразделений этой единицы, по крайней мере для электричества, проходящего через электролиты. *Мы будем предполагать в этой главе, что во всех электрических процессах, а не только в электролизе, не существует подразделений этой единицы*». Подчёркнутое нами место со всей очевидностью показывает, что Томсон с самого начала становится на точку зрения электронной теории, предполагая, что существует дискретный элементарный заряд, «ассоциируемый в теории электролиза с атомом одновалентного элемента».

Ход мыслей Томсона поразительно напоминает ход мыслей Ломоносова, размышлявшего одновременно и об атомной структуре вещества и о возможной структуре эфира. Томсон указывает, что его теория электрических явлений аналогична кинетической теории газов: объектом этого метода является объяснение явлений в электрическом поле, представленном в движении этих трубок, точно так же, как объектом кинетической теории газов является объяснение свойств газа движением молекул.

«Эти трубки аналогичны молекулам газа и в другом отношении: мы их рассматриваем как неуничтожаемые и несоздаваемые образования»¹.

Тем самым Томсон становится на точку зрения материальности поля, тогда как Максвелл рассматривал поле скорее как процесс или движение в эфире.

Трубки обладают движением и энергией, соответствующей этому движению. Движение присуще трубкам и эфиру и тогда, когда нет скорости поступательного движения трубок. Эта часть движения обуславливает потенциальную энергию. Движение же самих трубок производит кинетическую энергию магнитного поля. Трубка, падая на атом, изменяет его внутреннюю энергию. Должна существовать связь между химической природой атома и изменением электрической энергии трубок.

Разрабатывая математически эту картину, Томсон приходит к следующим уравнениям. Процесс в диэлектрике описывается числом трубок, проходящих через единицу площади, перпендикулярной к их направлению. Эту величину, называемую Максвеллом «смещением», Томсон называет поляризацией и компоненты её обозначает, по Максвеллу, буквами f , g , h . Поляризация связана с объёмной плотностью свободного электричества уравнением:

$$\rho = \frac{df}{dx} + \frac{dg}{dy} + \frac{dh}{dz}. \quad (1)$$

При движении трубок f меняется со временем. Подсчёт скорости изменения, произведённый Томсоном, даёт:

$$\frac{df}{dt} = \frac{d}{dy} (ug - vf) - \frac{d}{dz} (wf - uh) - u \left(\frac{df}{dx} + \frac{dg}{dy} + \frac{dh}{dz} \right).$$

Здесь u , v , w — компоненты скорости движения трубок в точках x , y , z . Имея в виду уравнение (1), получим:

$$\left. \begin{aligned} \frac{df}{dt} + u\rho &= \frac{d}{dy} (ug - vf) - \frac{d}{dz} (wf - uh); \\ \frac{dg}{dt} + v\rho &= \frac{d}{dz} (vh - wg) - \frac{d}{dx} (ug - vf); \\ \frac{dh}{dt} + w\rho &= \frac{d}{dx} (wf - uh) - \frac{d}{dy} (vh - ug). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

По уравнениям Максвелла

$$\left. \begin{aligned} 4\pi p &= \frac{d\gamma}{dy} - \frac{d\beta}{dz}; \\ 4\pi q &= \frac{d\alpha}{dz} - \frac{d\gamma}{dx}; \\ 4\pi r &= \frac{d\beta}{dx} - \frac{d\alpha}{dy}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

¹ J. J. Thomson, Recent Researches on Electricity and Magnetism, Oxford, 1893, стр. 17.

где p, q, r — компоненты полного тока, α, β, γ — компоненты вектора магнитной силы (напряжённости магнитного поля). Таким образом, движущаяся фарадеевская трубка производит магнитное поле, компоненты напряжённости которого даются уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= 4\pi (vh - wg); \\ \beta &= 4\pi (wf - uh); \\ \gamma &= 4\pi (ug - vf). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

В современных обозначениях эта связь выражается формулой

$$\vec{H} = [\vec{v} \vec{D}].$$

Это магнитное поле является носителем энергии и именно кинетической энергии движения трубок. Энергия распределена в поле с плотностью

$$\frac{\mu}{8\pi} (\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2) = 2\pi\mu [(hv - gw)^2 + (fw - hu)^2 + (gu - fv)^2].$$

Дифференцируя это выражение по компоненте скорости, найдём компоненту плотности количества движения поля — «момент единицы объёма» по терминологии Томсона. Компоненты вектора плотности количества движения диэлектрика получаются в виде

$$U = gc - hb, \quad V = ha - fc, \quad W = fb - ga, \quad (5)$$

где a, b, c — компоненты магнитной индукции;

$$\vec{B} = \mu \vec{H}.$$

«Интересно отметить, — пишет Томсон, — что компоненты момента в поле, даваемые уравнениями (5), пропорциональны величине энергии, переносимой в единицу времени через единицу площади, перпендикулярной соответственно x, y, z , по теореме Пойнтинга о переносе энергии в электромагнитном поле (Phil. Trans., ч. II, 1884, стр. 343). Следовательно, направление, по которому предполагается движение энергии в теории Пойнтинга, есть то же, что и направление момента, определяемое предыдущим выражением»¹.

Таким образом, Томсон ввёл *вектор электромагнитного количества движения*, величина которого, рассчитанная на единицу объёма, пропорциональна величине вектора Умова-Пойнтинга, а направление совпадает с направлением этого вектора. В современных обозначениях вектор плотности электромагнитного импульса даётся выражением

$$\vec{K} = \frac{1}{4\pi c} [\vec{E} \vec{H}] = \frac{\vec{P}}{c^2}, \quad (6)$$

где $\vec{P} = \frac{c}{4\pi} [\vec{E} \vec{H}]$ — вектор Умова-Пойнтинга. Это выражение совпадает с уравнением (5), если принять во внимание, что в единицах, применяемых Томсоном, скорость распространения электрических волн $c_1 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}$ и

¹ J. J. Thomson, Recent Researches on Electricity and Magnetism, Oxford, 1893, стр. 97.

$f = \frac{c}{4\pi} E_x$, $g = \frac{c}{4\pi} E_y$. Уравнения для напряжённости электрического поля Томсон получает, дифференцируя выражение энергии по компонентам поляризации f, g, h . Отсюда компоненты напряжённости электрического поля (электродвижущей силы по терминологии Максвелла-Томсона) будут:

$$X = wb - vc, \quad Y = uc - wa, \quad Z = va - ub. \quad (7)$$

Общий результат исследований Томсон формулирует следующим образом: «Когда фарадеева трубка находится в движении, то это движение сопровождается: 1) — магнитной силой, перпендикулярной к трубке и направлению её движения; 2) — моментом, перпендикулярным трубке и магнитной индукции, 3) — электродвижущей силой, перпендикулярной направлению движения и магнитной индукции; эта сила стремится поставить трубку перпендикулярно направлению её движения». Если имеется не одна, а несколько родов трубок, то получаются обобщённые формулы для магнитной силы:

$$\alpha = 4\pi \Sigma (vh - wf), \quad \beta = 4\pi \Sigma (wg - uh), \\ \gamma = 4\pi \Sigma (ug - vf), \quad (8)$$

для момента

$$U = c \Sigma g - b \Sigma h, \quad V = a \Sigma h - c \Sigma f, \quad W = b \Sigma f - a \Sigma g \quad (9)$$

и электродвижущей силы в точке

$$X = b\bar{w} - c\bar{v}, \quad Y = c\bar{u} - a\bar{w}, \quad Z = a\bar{v} - b\bar{u}, \quad (10)$$

где $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$ — средние значения из скоростей трубок. Поэтому, если имеются два ряда положительных и отрицательных трубок, движущихся с равными скоростями в противоположных направлениях, то электрического поля не будет, а магнитная сила будет отлична от нуля. Так можно интерпретировать, например, поле постоянного магнита.

Из уравнений (9) для электромагнитного количества движения Томсон выводит выражение электрической силы, действующей на единицу объёма среды; компоненты этой силы соответственно равны

$$cq - br, \quad ar - cp, \quad bp - aq. \quad (11)$$

Применяя все эти результаты к исследованию случая заряжённой сферы, движущейся со скоростью w вдоль оси z , Томсон получает следующие выражения для компонент электрической поляризации:

$$f = \frac{c}{4\pi} \frac{V}{(V^2 - w^2)^{\frac{1}{2}}} \cdot \frac{x}{\left(x^2 + y^2 + \frac{V^2}{V^2 - w^2} z^2\right)^{\frac{3}{2}}};$$

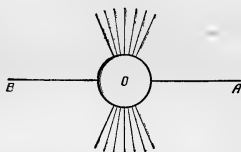


Рис. 123. Силовые линии движущегося заряда (рисунок из книги Дж. Дж. Томсона)

$$g = \frac{c}{4\pi} \frac{V}{(V^2 - w^2)^{\frac{1}{2}}} \cdot \frac{y}{\left(x^2 + y^2 + \frac{V^2}{V^2 - w^2} z^2\right)^{\frac{3}{2}}};$$

$$h = \frac{c}{4\pi} \frac{V}{(V^2 - w^2)^{\frac{1}{2}}} \cdot \frac{z}{\left(x^2 + y^2 + \frac{V^2}{V^2 - w^2} z^2\right)^{\frac{3}{2}}}.$$

Здесь $V = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}$ — скорость света. Из этих формул видно, что

$$\frac{f}{x} = \frac{g}{y} = \frac{h}{z},$$

т. е. фагадеева трубка направлена радиально, и величина поляризации изменяется обратно пропорционально величине:

$$r^2 \left(1 + \frac{w^2}{V^2 - w^2} \cos^2 \theta\right)^{\frac{3}{2}},$$

где r — расстояние рассматриваемой точки от центра сферы, а θ — угол, образованный r с направлением движения сферы.

Поле оказывается неравномерным: поляризация наибольшая при $\theta = \frac{\pi}{2}$ и наименьшая при $\theta = 0$. Этот же результат был получен другим методом Хевисайдом в 1889 г. (Phil. Mag., апрель 1889 г.). Для компонент магнитной силы получаются выражения:

$$\alpha = 4\pi w g, \quad \beta = 4\pi w f, \quad \gamma = 0. \quad (16)$$

Для компонент плотности электромагнитного количества движения получаются выражения:

$$u = -\beta h = -\frac{e^2}{4\pi} \frac{v^2 w}{v^2 - w^2} \frac{xz}{\left(x^2 + y^2 + z^2 \frac{v^2}{v^2 - w^2}\right)^3};$$

$$v = \alpha h = -\frac{e^2}{4\pi} \frac{v^2 w}{v^2 - w^2} \frac{yz}{\left(x^2 + y^2 + z^2 \frac{v^2}{v^2 - w^2}\right)^3};$$

$$w = \beta f - \alpha g = \frac{e^2}{4\pi} \frac{v^2 w}{v^2 - w^2} \frac{x^2 + y^2}{\left(x^2 + y^2 + z^2 \frac{v^2}{v^2 - w^2}\right)^3}.$$

Поэтому направление вектора плотности электромагнитного количества движения перпендикулярно к радиусу рассматриваемой точки и к магнитной силе. Численное значение момента единицы объёма (т. е. плотности электромагнитного количества движения) равняется:

$$\frac{e^2 w}{4\pi} \frac{V^2}{V^2 - w^2} \cdot \frac{1}{r^4} \cdot \frac{\sin \theta}{\left(1 + \frac{w^2}{V^2 - w^2} \cos^2 \theta\right)^3}.$$

Полное электромагнитное количество движения представляется вектором, направленным параллельно движению сферы и численно равным

$$\begin{aligned}
 I &= \frac{e^2 w}{4\pi} \frac{V^2}{V^2 - w^2} \int_a^\infty \int_0^\pi \int_0^{2\pi} \frac{\sin^2 \theta r^2 dr \sin \theta d\theta d\psi}{r^4 \left(1 + \frac{w^2}{V^2 - w^2} \cos^2 \theta\right)^3} = \\
 &= \frac{e^2 w}{a} \frac{V^2}{V^2 - w^2} \int_0^1 \frac{\sin^2 \theta d(\cos \theta)}{\left(1 + \frac{w^2}{V^2 - w^2} \cos^2 \theta\right)^3} = \\
 &= \frac{e^2 w}{2a} \frac{V^2}{(V^2 - w^2)^{\frac{1}{2}}} \left[\vartheta \left(1 - \frac{1}{4} \frac{V^2}{w^2}\right) + \frac{1}{2} \sin \vartheta \left(1 + \frac{1}{4} \frac{V^2}{w^2} \cos 2\vartheta\right) \right],
 \end{aligned}$$

где

$$\vartheta = \arctg \frac{w}{\frac{1}{2} \sqrt{V^2 - w^2}}.$$

Поэтому полный момент движущейся сферы равен $m\omega + I$, где m — механическая масса сферы; следовательно, масса заряжённой сферы увеличивается на $\frac{I}{\omega}$, т. е. на величину

$$\frac{1}{2} \frac{e^2}{a} \frac{V^2}{(V^2 - w^2)^{\frac{1}{2}}} \left[\vartheta \left(1 - \frac{1}{4} \frac{V^2}{w^2}\right) + \frac{1}{2} \sin \vartheta \left(1 + \frac{1}{4} \frac{V^2}{w^2} \cos 2\vartheta\right) \right].$$

В пределе $w = V$ эта дополнительная масса становится бесконечной, т. е. заряжённая сфера, движущаяся со скоростью света, ведёт себя так, как если бы её масса была бесконечно велика и, следовательно, скорость её не может более возрастать, остаётся постоянной.

Таким образом, Томсон приходит к важному выводу: «Невозможно возрастание скорости заряжённых тел, движущихся через диэлектрик до скорости, большей скорости света».

Мы изложили здесь, держась возможно ближе к подлиннику, происхождение идеи электромагнитной массы у Томсона. Эта «дополнительная» масса, как указывал Томсон в другом месте, «находится не в самом наэлектризованном теле, но в пространстве, окружающем его: дело происходит таким образом, как если бы выходящие из заряжённого тела силовые линии, проходя через эфир окружающего пространства, приводили этот эфир в движение, так что избыточной массой заряжённого тела являлась бы масса эфира, приведённого в движение электрическими силовыми линиями». Для обычных микроскопических тел этот добавочный электромагнитный эффект ничтожен. Однако скоро было открыто существование микрочастиц, в которых электромагнитная масса играет фундаментальную роль.

Возникновение
электронной
теории.

Такие частицы были открыты Дж. Дж. Томсоном в 1897 г. (об истории этого открытия будет рассказано в следующей главе). Эти частицы получили название электронов. Но идеи электронной теории возникли и развились задолго до открытия электронов. Изложенная здесь теория Томсона, как мы видели, уже оперирует дискретными атомами



Г. А. Лорентц

электричества; они являются концами единичных фарадеевских трубок.

Первый очерк синтетической теории электромагнитных процессов, в котором идеи теории поля соединяются с представлениями об атомном строении электричества, был дан Г. А. Лорентцом в 1878 г. Основная идея Лорентца заключалась в том, что каждая нейтральная молекула вещества рассматривается как совокупность некоторого числа мельчайших заряженных частичек — ионов, заряды которых одинаковы по величине, но могут быть противоположны по знаку. В 1903 г. Лорентц формулировал основные положения своей теории следующим образом:

«Теория (имеется в виду электронная теория. — П. К.) ... возникла из потребности набросать более ясную и детальную картину электромагнитных процессов в весомах телах, чем та, которая может быть дана теорией Ма к с -

велла - Герца. Она пытается достигнуть этой цели тем, что, во-первых, предполагает существование эфира также и внутри весомах тел, и, во-вторых, — использует воззрения молекулярной теории, которая оказалась такой плодотворной в других областях. Для первого допущения она находит весьма веские основания во многих оптических явлениях, в отдельных случаях прямо-таки принудительного характера. Связь между материей (Лорентц различает весомую материю и эфир. — П. К.) и эфиром она ищет в маленьких, снабженных электрическими зарядами частичках».

«Ясно, что в названных допущениях имеется в некотором смысле возврат к старому, предложенному Вильгельмом Вебером учению об электричестве, которое оперирует с двумя электрическими жидкостями. Однако сохраняется основная идея теории Максвелла; все электромагнитные действия осуществляются посредством эфира и именно таким образом, что вообще любое изменение в состоянии электронов оказывает некоторое влияние, которое распространяется со скоростью света»¹.

Представление об электрической структуре вещества позволило Лорентцу поставить вопрос о вычислении электрических характеристик вещества, которые в теории Максвелла задаются эмпирически. В частности в указанной работе Лорентц вычислил диэлектрическую постоянную на основе гипотезы о механизме поляризации. Дадим представление об этой теории.

Согласно гипотезе Лорентца, под действием электрического поля, напряженность которого X , заряженные частицы (заряд каждой из которых равен e) смещаются в противоположные стороны, причём между разноимёнными зарядами при их смещении возникает сила, пропорциональ-

¹ Н. А. Lorentz, Elektronentheorie, «Enz. d. exakt. Wissensch.», т. V, стр. 151—154.

ная смещению (квазиупругие диэлектрики). Электрическое равновесие частицы определяется равенством

$$eX = fx. \quad (1)$$

f — коэффициент, характеризующий связь заряженных частиц (коэффициент «упругости»). Если диэлектрик помещен в однородном поле плоского конденсатора с площадью обкладок S и N — число заряженных частиц одного знака в единице объема, то вследствие смещения на границах диэлектрика появятся заряды, плотность которых равна суммарному заряду частиц, содержащихся в слое толщиной x и основанием в 1 см^2 , т. е. $\sigma = Nex$. Если плотность фарадеевских трубок внешнего поля F , то полная напряженность поля, создаваемого «истинными» и «поляризованными» зарядами обкладок конденсатора, будет:

$$X = 4\pi F - 4\pi Ne x = 4\pi F - 4\pi Ne \frac{eX}{f}. \quad (2)$$

Отсюда

$$X = \frac{4\pi F}{1 + \frac{4\pi Ne^2}{f}}. \quad (3)$$

Величина $\epsilon = 1 + \frac{4\pi Ne^2}{f}$ (4) характеризует ослабление поля диэлектриком и называется диэлектрической постоянной. Она зависит от структуры молекул и от плотности диэлектрика, так что

$$\frac{\epsilon - 1}{d} = \text{const} \quad (5)$$

(d — плотность диэлектрика, пропорциональная числу частиц).

Измерения Больцмана показали, что этот закон выполняется для газов. Однако для конденсированных веществ эта формула не может считаться применимой. В этом случае, кроме внутренней связи частиц в молекуле, должно сказываться действие окружающих поляризованных молекул.

В наиболее простом случае изотропного распределения окружающих центров вокруг рассматриваемого центра эта сила равна $\frac{4\pi}{3} Ne^2 x$. Таким образом полная сила связи

$$fx = f'x - \frac{4\pi}{3} Ne^2 x. \quad (6)$$

Следовательно,

$$f = f' - \frac{4\pi}{3} Ne^2$$

(f' — коэффициент связи между частицами одной молекулы). Поэтому

$$X = 4\pi F - 4\pi Ne^2 \frac{X}{f' - \frac{4}{3} \pi Ne^2}.$$

Отсюда

$$\epsilon = \frac{f' + \frac{8\pi}{3} Ne^2}{f' - \frac{4\pi}{3} Ne^2} \quad (7)$$

и

$$\frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} = \frac{4\pi Ne^2}{3f'} = \beta d. \quad (8)$$

Аналогичное соотношение было получено в 1847 г. Моссотти и независимо от него в 1879 г. Клаузиусом на основе представления, что диэлектрик представляет собой эфир, в который вкраплены проводящие шарики. Г. А. Лорентц получил его в 1880 г. из описанных здесь соображений.

В 1891 г. формулу (8) проверял для паров Лебедев и пришёл к выводу, что «соотношением (8) можно с выгодой пользоваться как эмпирической формулой, связывающей плотность вещества с его диэлектрической постоянной»¹.

Г. Лорентц, используя соотношение Максвелла $n^2 = \epsilon$, получил из (8) связь между показателем преломления и плотностью среды:

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \cdot \frac{1}{d} = C.$$

Этот закон в том же 1880 г. был выведен другим путём Л. Лоренцом и в настоящее время носит название формулы Лорентца-Лоренца.

Теория Г. Лорентца приводит далее к обобщённому выражению силы, действующей на движущийся заряд. Это выражение так называемой силы Лорентца

$$\vec{f} = \frac{e}{c} [\vec{v}H].$$

Г. Лорентц использовал это выражение в 1884 г. для объяснения так называемого эффекта Холла, открытого Холлом в 1879 г. Опыт Холла заключался в следующем: на стеклянной пластинке gg помещалась очень тонкая металлическая пластинка крестообразной

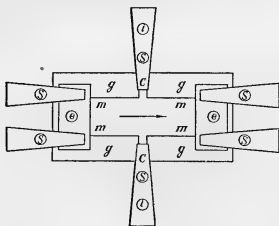


Рис. 124. К эффекту Холла

формы. С помощью пары зажимов e через пластинку пропускается ток. Другая пара зажимов C присоединена к поперечным выступам пластинки и соединяет их с чувствительным гальванометром. Соскабливая края пластинки mm , достигают того, что при пропускании тока в главном направлении ток через гальванометр не идёт, т. е. оба поперечных выступа пластины находятся при одинаковых потенциалах. Если же пластину поместить в магнитное поле так, что её плоскость перпендикулярна силовым линиям, то в гальванометр отводится ток, что указывает на появление разности потенциалов, действующей поперёк движения тока.

¹ И. Н. Лебедев, Собр. соч., стр. 26.

Эта поперечная электродвижущая сила в зависимости от рода металла может иметь или положительный или отрицательный знак, причём под положительным знаком считают тот, в котором направление электродвижущей силы совпадает с направлением электромагнитной силы, испытываемой током в тех же условиях. Холл вывел экспериментально, что электродвижущая сила E , возбуждаемая магнитным полем H , выражается формулой

$$E = RH \frac{I}{\delta}.$$

Здесь I — сила тока в пластинке, δ — её толщина. Величина R называется «вращательным коэффициентом».

По Лорентцу, на движущийся заряд действует в поперечном магнитном поле сила, перпендикулярная скорости его движения

$$f = evH.$$

Эта сила интерпретируется как действие напряжённости электрического поля $E = \frac{f}{e} = vH$; на ширине пластинки l она создаёт разность потенциалов

$$E = El = vHl.$$

С другой стороны, если n — число электронов в 1 см^3 и v — скорость их движения, то сила тока

$$I = nev\delta l,$$

откуда

$$v l = \frac{I}{ne\delta},$$

и, следовательно:

$$E = \frac{1}{ne} \cdot \frac{IH}{\delta}.$$

Постоянная Холла:

$$R = \frac{1}{ne}.$$

Измерения этой постоянной производили Эттингсгаузен и Нернст в 1884 г. и нашли, что она для большинства металлов имеет отрицательное значение. Это объясняется, если предположить, что ток обусловлен движением отрицательных частичек. Однако для ряда металлов (железо, цинк, свинец и др.) она имеет положительный знак. Этот факт не получил объяснения в электронной теории и был разъяснён только квантовой механикой.

Таковы были результаты, полученные электронной теорией ещё до опытов Герца и открытия электронов. Как видим, развитие науки не происходит по стройной схеме, так, чтобы одно направление, развившись до конца, сменилось другим, дополняющим и углубляющим это направление. Ещё до того, как теория Максвелла получила доказательство в опытах Герца, возникла сменявшая её электронная теория, причём в годы её возникновения появились опыты, послужившие основой для сменявшей теорию Лоренца теории относительности.

Возвратимся к вопросу о механических свойствах поля.

**Световое
давление.**

Как мы видели, Максвелл интерпретировал механические силы взаимодействия наэлектризованных или намагниченных тел с помощью натяжений и давлений, производимых полем. Этот способ описания он перенёс и на переменное электромагнитное

поле и вывел отсюда существование светового давления. Световая электромагнитная волна давит на поглощающую её поверхность с силой, равной объёмной плотности электромагнитной энергии. Вывод этот, как мы уже говорили, нельзя было считать вполне обоснованным.

В 1876 г. Бартоли обосновал существование светового давления из термодинамических соображений. Доказательство Бартоли основано на том, что если бы такое давление отсутствовало, то был бы возможен эксперимент при котором теплота посредством излучения передавалась бы от менее нагретого тела к более нагретому без затраты работы. Бартоли доказывал далее, что это давление равно объёмной плотности лучистой энергии. Это доказательство в 1892 г. Б. Б. Голицын подверг критике.

В 1884 г. Больцман получил из термодинамических соображений следующее выражение для давления излучения:

$$P = \frac{\pi}{v} \left[T \int \frac{1}{T} \frac{dE}{dT} dT - E \right] = \frac{\pi}{v} \left[T \int \frac{E}{T^3} dT \right].$$

Здесь v — скорость света, E — количество энергии, излучаемой единицей поверхности в единицу времени. Если положить $E = aT^4$, то $P = \frac{\pi a T^4}{3v} = \frac{u}{3}$.

Голицын в 1892 г. получил формулу:

$$P = \frac{4}{v} \left[\frac{1}{T} \int \frac{dE}{dT} dT - E \right].$$

В 1891 г. появилась статья П. Н. Лебедева «Об отталкивательной силе лучеиспускающих тел». В этой работе Лебедев сравнивает силу светового давления, оказываемую Солнцем на тело, с силой притяжения того же тела Солнцем. Если это тело имеет форму шара радиуса r , то его вес

$$G = \frac{4}{3} \pi r^3 \delta A.$$

Здесь δ — плотность тела, A — сила, с которой 1 г притягивается на данном расстоянии к Солнцу (напряжение поля тяжести). Сила светового давления

$$H = \pi r^2 P_0.$$

Отступление от закона Ньютона, обусловленное действием светового давления, определяется отношением

$$F = \frac{G - H}{G} = 1 - \frac{H}{G} = 1 - \frac{3}{4} \frac{P_0}{A r \delta}.$$

Чем меньше радиус r тела, тем больше сказывается сила светового давления. Однако, когда размеры тела приближаются к размерам молекулы, это вычисление утрачивает своё значение, «так как отдельные молекулы не суть абсолютно чёрные тела и радиус их мал сравнительно с длиной волны падающего на них света»¹.

Рассматривая далее более общий случай притяжения лучеиспускающим телом другого тела, Лебедев приходит к результату, «что два шаровидных

¹ П. Н. Лебедев, Собр. соч., стр. 30.

тела, температура которых около 0°C , плотности которых $\Delta = \delta = 10$ и радиусы $R = r = 4 \text{ мм}$, в мировом пространстве не притягивают и не отталкивают друг друга». При дальнейшем уменьшении размеров тел сила отталкивания превалирует над силой притяжения: «так пылинки, радиус которых не превышает одной тысячной миллиметра, будут отталкиваться при 0°C в мировом пространстве с силой, порядок которой в миллион раз превышает порядок силы их ньютоновского притяжения»¹.

Хотя эти расчёты и не применимы к случаю молекулярного взаимодействия (здесь, по Лебедеву, вступают в силу резонансные соотношения), однако они показывают, «что при изучении сущности так называемых «молекулярных сил» мы не можем пренебрегать силами, возникающими от лучеиспускания, не определив предварительно той доли молекулярных сил, которую они составляют, и не отделив эти известные силы от неизвестных». Эту задачу Лебедев и решил в своих последующих исследованиях, увенчавшихся открытием светового давления на опыте.

В 1893 г. О. Хевисайд (1850—1925) в своей «Электромагнитной теории» подтвердил выводы Больцмана и Голицына о среднем давлении изотропной радиации ($p = \frac{1}{3}u$).

В 1894 г. появилась первая часть работы Лебедева «Экспериментальное исследование пондеромоторного действия волн на резонаторы». Сущность этой работы сформулирована Лебедевым следующим образом: «Если мы станем на точку зрения электромагнитной теории света, если мы сделаем допущение, что волны Герца суть световые волны большого периода, то мы можем наши опыты рассматривать как попытку на чрезмерно больших схематических моделях молекул в основных чертах исследовать законы тех молекулярных сил, которые обусловлены взаимным лучеиспусканием молекул»².

В 1895 г. Г. А. Лорентц в своей знаменитой книге «Опыт теории электромагнитных и оптических явлений в движущихся телах», о которой у нас будет идти речь дальше, вновь обосновывает существование сил светового давления исходя из уравнений своей теории.

В 1896 г. Лебедев публикует вторую часть своего исследования пондеромоторного действия волн на резонаторы, посвящённую гидродинамическим резонаторам. В этой работе Лебедев показал, что к гидродинамическим резонаторам применимы те же соотношения, какие были получены для электромагнитных резонаторов. Силы взаимодействия между вибратором и резонатором могут быть как притягательные, так и отталкивательные, в зависимости от соотношения их чисел колебаний.

В 1897 г. появилась третья часть исследования Лебедева, относящаяся к акустическим резонаторам. Здесь при небольших расстояниях наблюдались те же взаимодействия между вибратором и резонатором, как и в двух предыдущих случаях, т. е. притяжения и отталкивания. Но если расстояние между взаимодействующими центрами увеличивалось настолько, что волну, испущенную вибратором, можно было рассматривать в месте нахождения резонатора как плоскую, то положение менялось. Лебедев установил:

«1. Плоская волна, падающая на резонатор, стремится увести его в направлении движения, т. е. источник звука производит отталкивание резонатора.

¹ П. Н. Лебедев, Собр. соч., стр. 30.

² Там же, стр. 84.

2. Это давление плоской волны на резонатор достигает максимума при полном резонансе и при переходе через него не меняет знака»¹.

В связи с этим Лебедев проводит дополнительное теоретическое исследование для электромагнитных волн и показывает, «что и в этом случае ход явления для электромагнитных резонаторов тождественен с наблюдаемым для акустических резонаторов». «Становясь на точку зрения электромагнит-

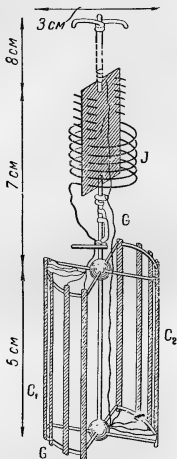


Рис. 125. Магнитный резонатор П. Н. Лебедева

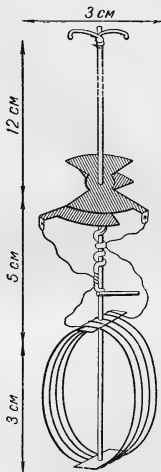


Рис. 126. Электрический резонатор П. Н. Лебедева

ной теории, — продолжает Лебедев, — мы могли бы применить рассмотренные результаты к изучению отталкивательного действия Солнца на кометные хвосты, на что я уже ранее указывал...»² (Лебедев имеет в виду свою, рассмотренную нами выше работу 1891 г.). Через два года в Женеве Лебедев делал предварительное сообщение о своих опытах по исследованию светового давления, а в следующем 1900 г. на Международном конгрессе физиков в Париже сделал доклад о проведённом им опытным определении светового давления на твёрдые тела.

При решении этой задачи Лебедеву пришлось преодолеть серьёзные трудности. Ещё Целльнер в 1877 г., пытаясь осуществить указанный Максвеллом опыт по обнаружению светового давления, потерпел неудачу. Целль-

¹ П. Н. Лебедев, Собр. соч., стр. 116.

² Там же, стр. 119.

нер указал при этом, что теоретическое значение светового давления в 100 000 раз меньше радиометрических сил, наблюденных Круксом в 1874 г. Лебедев, исследуя предварительно это обстоятельство, нашёл, что радиометрические силы далеко не достигают того значения, которое указал Целльнер, и решил осуществить эксперимент по простому методу, указанному Максвеллом.

Чтобы исключить влияние конвекции, Лебедев направлял световой пучок попеременно то с одной, то с другой стороны крылышка. Для исключения влияния радиометрических сил, зависящих от разности температур на обеих сторонах крылышка, Лебедев применил крылышки различной толщины и таким путём мог вычислить отклонение при толщине, равной нулю, когда радиометрические силы отсутствуют. Кроме того, он улучшил технику откачивания, введя метод испарения и последующего охлаждения ртутной капли.

Свой приём Лебедев описывает следующим образом:

«Капля ртути Q была помещена на дно стеклянного баллона B , затем воздух разрежался насосом и ртутная капля нагревалась в водяной бане K на 5° С выше комнатной температуры; испаряясь, ртуть перегоняется в насос и увлекает с собой остатки воздуха из баллона. Если отделить баллон от насоса и осушителя P при помощи барометрического запора V , то в баллоне останутся только ртутные пары, их давление уменьшится до весьма малой величины, если наполнить сосуды K_1 и K_2 охлаждающей смесью из льда и соли»¹.

Наконец, чтобы избежать возможных реакционных сил при распылении освещённых поверхностей, которые будут зависеть от длины световой волны и химической природы вещества крылышка, Лебедев применил светофильтры и делал опыты с различными крылышками. Никаких заметных действий этих реакционных сил не обнаружилось.

В установке Лебедева свет от дуговой лампы B с помощью конденсатора C собирался на диафрагме D . Пучок, выходящий из диафрагмы (отверстие 4 мм), падал на линзу K и шёл дальше параллельным пучком. На пути параллельного пучка помещался плоскопараллельный сосуд с водой ω , поглощающей инфракрасные лучи с длиной волны, большей 1,2 μ . Стекланные линзы задерживали с своей стороны ультрафиолетовые лучи.

Далее параллельный пучок, отражаясь от зеркал S_1, S_2, S_3 и собираясь линзой L_1 , направлялся на крылышко, помещённое в стеклянном баллоне. В R получалось увеличенное изображение ($d' = 10$ мм) диафрагмы D .

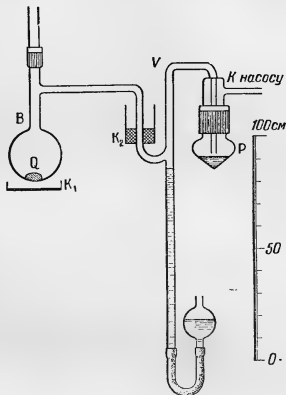


Рис. 127. Насос Лебедева

¹ П. Н. Лебедев, Собр. соч., стр. 132—133

Передвижением двойного зеркала S_4S_5 пучок можно было направить на крылышко с помощью зеркал S_4, S_5, S_6 и линзы L_2 с противоположной стороны.

Между линзой L_1 и баллоном помещалась стеклянная пластинка P с наклоном 45° к потоку. Большая часть света проходит через неё в баллон, отражённая часть даёт действительное изображение диафрагмы, падающее на термостолбик T .

Лебедев употреблял три типа приборов. Прибор первого типа (I) представлял стеклянный стержень, к которому

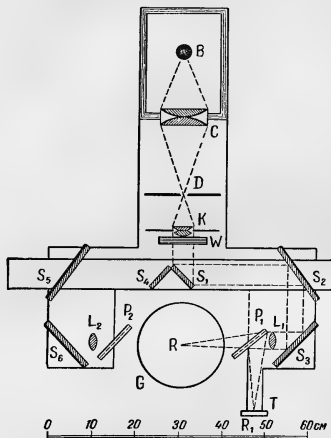


Рис. 128. Установка П. Н. Лебедева для обнаружения давления света на твёрдые тела

платиновыми колечками были прицеплены два платиновых креста с платиновыми крылышками одинакового диаметра (5 мм), одно из каждой пары крылышек было с обеих сторон зеркальным, другое с обеих сторон покрыто платиновой чернью. Одна пара крылышек имела большую толщину, чем другая. Стержень подвешивался свободно к крючку крутильной нити с помощью платиновой петельки D .

Прибор второго типа (II) состоял из стеклянного стерженька, к которому были прицеплены две платиновые поперечные проволоки, играющие роль держалок. Между ними с обеих сторон стержня было натянута по паре тонких платиновых проволок (0,05 мм), проходивших через маленькие отверстия в металлических крылышках и удерживающих их в вертикальной плоскости. Прибор подвешивался к крючку крутильной нити кардановым подвесом C и удерживался в вертикальном положении добавочным платиновым грузом B .

Прибор третьего типа (III) устроен аналогично прибору первого типа, но снабжён кардановым подвесом. Крылышки изготовлялись из платины, алюминия, никеля, слюды. Толщина платнированной платины варьировалась в отношении 1:5. Толщина зеркальных крылышек была 0,1 мм, 0,02 мм, слюды 0,01 мм.

Энергия падающих лучей измерялась калориметрически. Фонарь с системой зеркал передвигался на салазках: он отодвигался от баллона настолько, что на место крылышка могла быть поставлена равная ему диафрагма D ($d = 5$ мм). Все лучи, падающие на диафрагму, поглощались калориметром; стеклянная пластинка G компенсировала ослабление света при отражении от стеклянных стенок баллона.

Калориметры Лебедева были двух типов. Первый калориметр состоял из куска меди и просверлённого в нём канала, заполненного ртутью. В ртути помещался шарик маленького термометра, позволяющего отсчитывать

пятые доли градуса. Водяной эквивалент системы был 3,13 г. Поглощающая поверхность калориметра была закопчёна.

Второй калориметр, так же как и первый, состоял из меди и имел водяной эквивалент 3,61 г. Цилиндр калориметра находился внутри медной трубы, помещённой в водяной бане, снабжённой мешалкой *R*. До начала опыта калориметр охлаждался до температуры, меньшей температуры бани. Для этого по воронке *A* наливают в углубление калориметра несколько капель этилового эфира, испаряющегося с помощью резиновой груши *B*.

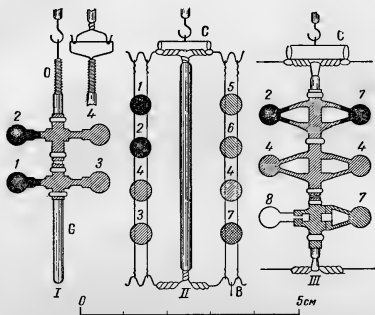


Рис. 129. Подвесы для измерения светового давления на твёрдые тела

Скрупулёзная обработка всех очень кропотливых и утомительных измерений (достаточно сказать, что одна откачка баллона производилась несколько дней) привела Лебедева к следующим выводам:

«1. Падающий пучок света производит давление как на поглощающие, так и на отражающие поверхности; эти пондеромоторные силы не связаны с уже известными вторичными конвекционными и радиометрическими силами, вызываемыми нагреванием.

2. Силы давления света прямо пропорциональны энергии падающего луча и не зависят от цвета.

3. Наблюдённые силы давления света, в пределах погрешностей наблюдений, количественно равны максвелло-бартолиевым силам давления лучистой энергии.

Таким образом, существование максвелло-бартолиевых сил давления опытным путём установлено для лучей света»¹.

Электромагнитное
количество
движения; момент
количества
движения

Опыты Лебедева вызвали огромный резонанс. Известный противник максвелловского светового давления В. Томсон (Кельвин) сдался перед неопровержимыми доказательствами Лебедева и признался в этом на одном из лондонских съездов К. А. Тимирязеву. Но опыты Лебедева не были простым подтверждением идеи Максвелла. Они вели

¹ П. Н. Лебедев, Собр. соч., стр. 147.

далее теорию электромагнитного поля и в частности убедительно доказывали, что поле обладает не только энергией, но и количеством движения. В самом деле, опыты Лебедева показывают, что под воздействием светового потока система испытывает механическое давление, а следовательно, получает механический импульс. Для единицы поглощающей поверхности изменение импульса в единицу времени по измерениям Лебедева равно

$$p = u = \frac{dG_m}{dt}.$$

Здесь p — давление, u — плотность энергии светового потока, G_m — механический импульс, сообщаемый поглощающему телу. Если обобщить

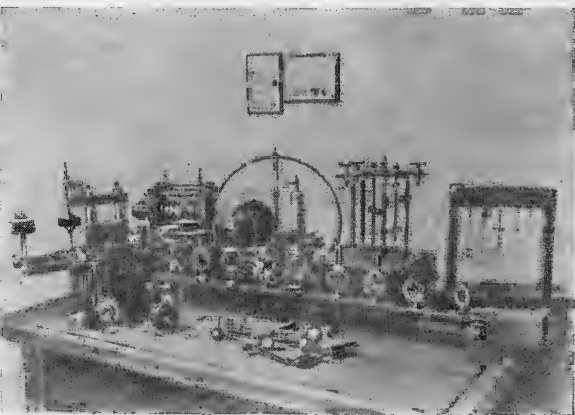


Рис. 130. Приборы П. Н. Лебедева

закон сохранения количества движения на систему свет — поглощающее тело, то для этой системы

$$\bar{G}_m + \bar{G} = \text{const}$$

и, следовательно,

$$\frac{d\bar{G}_m}{dt} = -\frac{d\bar{G}}{dt}.$$

Здесь $\frac{d\bar{G}}{dt}$ — убыль количества движения светового потока за единицу времени на единице поверхности. При этом поглотится энергия, заключённая в объёме светового поля с основанием в 1 см^2 и высотой c (скорость света).

¹ П. Н. Лебедев, Собр. соч., стр. 147.

Если сделать далее предположение, что в этом объёме был распределён поглощённый импульс светового поля, то плотность импульса

$$g = \frac{G}{c}$$

и, таким образом,

$$g = \frac{u}{c} = \frac{Y}{c^2},$$

где Y — вектор Умова-Пойнтинга. Это и есть то выражение, которое было дано Дж. Дж. Томсоном в 1893 г., впервые выдвинувшим идею, что электромагнитное поле является вместилищем механического импульса.

В 1900 г. Пуанкаре в статье «Теория Лорентца и принцип реакции» указал, что принцип действия и противодействия неприменим в теории Лорентца, так как в замкнутой области поля результирующая всех сил Лорентца не равна нулю, а выражается объёмным интегралом

$$\bar{F} = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial}{\partial t} \int \bar{Y} dv.$$

Отсюда следует, что всякое изменение количества движения системы сопровождается одновременным изменением величины, зависящей от состояния поля и распределённой с плотностью

$$\bar{g} = \frac{\bar{Y}}{c^2}.$$

Величину $G = \int \bar{g} dv$ Абрагам в 1902 г. назвал электромагнитным импульсом, или электромагнитным количеством движения.

В 1894 г. А. И. Садовский высказал идею о том, что свет, поляризованный по кругу, обладает моментом количества движения (вращательным импульсом). Через три года, в 1897 г., он обработал эту идею с точки зрения теории Максвелла. Исходя из статической аналогии (диполь, помещённый в электрическое поле, испытывает вращательный момент), Садовский, используя тот факт, что в анизотропной среде вектор поляризации не совпадает по направлению с вектором напряжённости поля, приходит к выводу, что и в переменном поле существует механическое ориентирующее действие световой волны. Если кристаллическая пластинка, вырезанная параллельно оптической оси, перерабатывает свет, поляризованный по кругу, в плоско поляризованный, то она получает механический вращательный момент, направленный в сторону вращения электрического вектора волны. Если она перерабатывает линейно поляризованный свет в свет, поляризованный по кругу, то испытывает вращательный момент в противоположном направлении.

Садовский рассчитал теоретически величину ожидаемого эффекта. Он оказался очень малым и не мог быть обнаружен тогдашними экспериментальными средствами. Свои результаты Садовский изложил в работе «Пондеромоторные действия электромагнитных и световых волн на кристаллы» (1898). Позже (1909) Пойнтинг интерпретировал эффект Садовского с помощью гипотезы, что световая волна, поляризованная по кругу, несёт вращательный импульс. Количество вращательного импульса, переносимого кругополяризованной волной в единицу времени через единицу поперечной площадки, равно $\frac{u\lambda}{2\pi}$, где u — объёмная плотность энергии.



А. И. Садовский

Электродинамика
движущихся
сред.

Дальнейшее развитие электродинамики Максвелла связано с изучением электромагнитных процессов в движущихся средах. Вопрос этот имел огромное принципиальное значение, и развитие электродинамики движущихся сред привело к глубокому изменению физических представлений о пространстве и времени. Развитие электронной теории и электромагнитной картины мира также тесно связано с изучением электромагнитных явлений в движущихся средах. К этим явлениям должны относиться и все движения светящихся, освещённых и пронизываемых светом тел, поскольку свет представляет собой электромагнитное явление. В этой главе мы ограничимся, однако, электродинамикой в узком смысле слова.

Максвелл, как мы видели в третьей главе, для индуцированного электрического поля в теле, движущемся со скоростью $\vec{v}$, написал уравнение

$$\vec{E} = [\vec{v}\vec{B}] - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \text{grad}\psi.$$

Отсюда

$$\text{rot } \vec{E} = \text{rot } [\vec{v}\vec{B}] - \frac{\partial}{\partial t} \text{rot } \vec{A} = \text{rot } [\vec{v}\vec{B}] - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = - \left\{ \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + \text{rot } [\vec{B}\vec{v}] \right\}.$$

В теории движущихся сред различают локальную и субстанциональную производные по времени. Локальная производная характеризует скорость изменения величины в фиксированной точке пространства, субстанциональная — в данном элементе движущейся среды. Субстанциональная производная по времени вектора в общем случае может быть выражена следующей формулой:

$$\frac{d\vec{A}}{dt} = \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \vec{v} \text{div } \vec{A} + \text{rot } [\vec{A}\vec{v}].$$

Электронная интерпретация эффекта Садовского была дана К. И. Шапошниковым в 1915 г.; ему же принадлежит (1924) квантовый вывод с точки зрения гипотезы о спине фотона. Экспериментально эффект Садовского был подтверждён в 1936 г. Бэтом.

Все эти результаты содействовали укреплению точки зрения, рассматривающей электромагнитное поле как особую форму материи. Вместе с тем они сыграли большую роль в возникновении электромагнитной картины мира, в которой ставилась задача объяснить все физические явления, за исключением может быть тяготения, на основе электронной теории.

С философской стороны открытие механических свойств электромагнитного поля и в частности света явилось блестящим подтверждением мысли Эн-

гельса, что механическое движение «никоим образом не исчерпывает природы соответствующего движения, но оно неотделимо от него».

Учитывая, что $\operatorname{div} \bar{B} = 0$, мы можем второе уравнение Максвелла для движущихся сред написать в виде

$$\operatorname{rot} \bar{E} = - \frac{d\bar{B}}{dt}.$$

Таким образом, закон индукции в движущемся контуре имеет ту же формулу, что и для неподвижного контура: индукционная электродвижущая сила равна скорости убыли потока индукции, охватываемого контуром. Эта скорость наглядно может быть охарактеризована числом силовых линий, пересечённых в секунду движущимся проводником. В такой формулировке закон индукции хорошо известен из учебников.

Обобщая понятие тока, Максвелл высказал мысль, что движущееся заряжённое тело аналогично току и создаёт магнитное поле. Он указывает, что это «предположение об эквивалентности движущегося заряжённого тела и электрического тока» можно проводить на опыте. «Для опыта можно было бы употребить заряжённый непроводящий диск и вращать его в плоскости магнитного меридиана вокруг горизонтальной оси. Измерение магнитного действия вращающегося диска можно было бы сделать с помощью магнитной стрелки, подвешенной вблизи верхнего или нижнего ребра диска, где магнитные действия должны быть наибольшими. Чтобы устранить непосредственное электростатическое действие диска на стрелку, необходимо было бы поместить между ними некоторый проводящий экран»¹. Этот опыт был поставлен в 1878 г. Н. А. Роуландом в лаборатории Гельмгольца. Приведём описание этого опыта, сделанное А. А. Эйхенвальдом.

«Расположение опыта у Роуланда было следующее. Горизонтальный эбонитовый диск диаметром 21 см и толщиной 0,5 см вращался вокруг вертикальной оси между двумя неподвижными горизонтальными стеклянными дисками. Обе стороны эбонитового диска и внутренние стороны стеклянных дисков были позолочены и представляли, таким образом, обкладки одного конденсатора. Обкладки эбонитового диска заряжались электричеством при посредстве остриев, отстоявших от ребра диска на 0,03 см, тогда как обкладки неподвижных дисков были соединены с землею. Над поверхностью стеклянного диска была подвешена аstaticеская система, состоявшая из двух магнитных стрелок длиной 1,5 см и взаимным расстоянием 18 см. Нижняя из стрелок находилась вблизи окружности вращающегося диска и имела направление, перпендикулярное к его радиусу. Стрелки были снабжены зеркальцем и заключены в латунной коробке, прикреплённой к стенной консоли и отведённой к земле. Наблюдения производились при помощи зеркала шкалы»².

Если диск приводился в движение со скоростью 61 оборот в секунду, то наблюдалось отклонение стрелки, приблизительно соответствовавшее ожидаемой величине.

Опыт Роуланда ввиду его важности неоднократно повторялся. Рентген в 1885 г. подтвердил качественно результат Роуланда. Однако Лехер (1889) никакого магнитного отклонения не получил. Далее опыты повторялись Гимштедтом (1889), Роуландом и Хетчинсоном (1889), Кремье (1900) и другими. Одни исследователи наблюдали

¹ А. А. Эйхенвальд, О магнитном действии тел, движущихся в электрическом поле, М., 1904, стр. 8.

² Там же, стр. 8—9.

отклонение (Гишмтедт, Роуланд и Хетчинсон), другие (Кремье) нет. Кроме того, и в положительных опытах наблюдались отклонения от теоретического значения. Вопрос был решён А. А. Эйхенвальдом, об исследованиях которого мы скажем ниже.

Следующий эксперимент, имеющий целью обнаружить магнитное действие диэлектриков, движущихся в электрическом поле, был поставлен в 1890 г. Рентгеном.

«В его опытах, — пишет Эйхенвальд, — горизонтальный диск из стекла или эбонита диаметром в 10 см и толщиной в 0,35 см вращался вокруг вертикальной оси между двумя неподвижными металлическими обкладками конденсатора. Над верхней обкладкой, отведённой к земле, висела магнитная стрелка. При перемене заряда в обкладках конденсатора во время вращения диска замечалось отклонение стрелки, причём направление этого отклонения вполне соответствовало предположению, что движущиеся фиктивные заряды диэлектрика по своему магнитному действию эквивалентны электрическим токам. Что же касается величины самого отклонения, то Рентген получил при разности потенциалов в 10 000 вольт и при 100 оборотах диска в секунду двойное отклонение в 2—3 мм, причём расстояние шкалы от зеркальца было 229 см. Таким образом магнитное действие было вне всякого сомнения наблюдаемо, однако всё же эти опыты не позволяли делать количественных измерений».

«Опыты Рентгена, — писал Эйхенвальд в 1904 г., — никем до сих пор повторены не были, хотя значение их в дальнейшей разработке электромагнитной теории для движущихся тел очевидно»¹.

Как же обстояло дело с разработкой самой электромагнитной теории для движущихся тел?

Первая систематическая теория движущихся сред была развита Герцем в 1890 г.

В основе теории Герца лежат две идеи. Первая та, что электромагнитные процессы в движущихся телах протекают по тем же законам, что и в покоящихся телах (принцип относительности); вторая — что эфир принципиально не отличается от обычных весомых сред, он разнится от них только специальными значениями электрических и магнитных констант. Исходя из этих принципов, Герц пишет уравнения Максвелла в интегральной форме:

$$\oint_e H_e dl = -\frac{1}{c} \frac{d}{dt} \int_s D_n dS + \frac{4\pi}{c} \int_s i_n dS;$$

$$\oint_e E_e dl = -\frac{1}{c} \frac{d}{dt} \int_s B_n dS;$$

$$\oint_s D_n dS = 4\pi \int_v \rho dv; \quad \int_s B_n dS = 0.$$

Здесь контуры, поверхности и объёмы интегрирования жёстко связаны с движущимся телом. Очевидно, что в этой форме уравнения Герца удовлетворяют принципу относительности и совпадают по форме с уравнениями Максвелла для неподвижной среды. Если использовать приведённое выше выражение для субстанциональной производной по времени векторной функ-

¹ А. А. Эйхенвальд, О магнитном действии тел, движущихся в электрическом поле, стр. 67—68.

ции, то получим дифференциальные уравнения электромагнитного поля в движущихся средах в форме Герца:

$$\operatorname{rot} \bar{H} = \frac{4\pi}{c} \bar{j} + \frac{1}{c} \left\{ \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} + \bar{v} \operatorname{div} \bar{D} + \operatorname{rot} [\bar{D} \bar{v}] \right\};$$

$$\operatorname{rot} \bar{E} = -\frac{1}{c} \left\{ \frac{\partial \bar{B}}{\partial t} + \operatorname{rot} [\bar{B} \bar{v}] \right\};$$

$$\operatorname{div} \bar{D} = 4\pi \rho;$$

$$\operatorname{div} \bar{B} = 0.$$

Отсюда видно, что при $v = 0$ они переходят в уравнения Максвелла для неподвижных тел. Если движется стационарное поле, в котором отсутствуют свободные заряды, то появляются добавочные эффекты, определяемые членами $[\bar{D} \bar{v}]$, $[\bar{B} \bar{v}]$: магнитное поле движущегося диэлектрика $\bar{H}' = [\bar{D} \bar{v}]$, электрическое поле движущегося магнетика $\bar{E}' = [\bar{B} \bar{v}]$. Но так как эфир отличается от диэлектрика только частным значением своих констант (например, $\epsilon = 1$), то эти выражения показывают, что эфир принимает участие в движении наравне с весомой материей (гипотеза полного увлечения эфира движущимися телами). Этой гипотезой и объясняется абсолютный (т. е. не зависящий от движения системы) характер электромагнитных процессов в электродинамике Герца.

В 1895 г. появилась книга Г. А. Лоренца «Опыт теории электрических и оптических явлений в движущихся телах». Следовательно, в отличие от Герца, Лоренц рассматривает и оптические процессы. Его точка зрения существенно отличается от точки зрения Герца. Он принимает, что эфир абсолютно неподвижен, оставаясь таковым даже тогда, когда движется весомая материя, содержащая этот эфир.

Для покоящейся среды система уравнений Лоренца имеет вид

$$\operatorname{div} \bar{d} = \rho + \rho';$$

$$\operatorname{div} \bar{h} = 0;$$

$$\operatorname{rot} \bar{d} = -\frac{1}{c} \bar{h};$$

$$\operatorname{rot} \bar{h} = \frac{1}{c} (\bar{d} + \rho \bar{v} + \rho' \bar{v}').$$

Здесь ρ — объёмная плотность подвижных зарядов молекул, ρ' — объёмная плотность неподвижных зарядов. В незаряженном теле $\rho + \rho' = 0$, $\bar{d}$ — напряжённость электрического микрополя, $\bar{h}$ — магнитного. Лоренц использует рационализированную систему единиц, в которой отсутствует множитель 4π в дифференциальных уравнениях поля. К этому добавляется уравнение движения связанного подвижного заряда

$$m \frac{d\bar{v}}{dt} = -f\bar{q} + \rho \bar{d} + \frac{1}{c} \rho [\bar{v} \bar{h}].$$

Здесь $\bar{q}$ — смещение заряда, f — коэффициент связи. Если в неподвижном диэлектрике распространяется плоская линейно поляризованная волна со

· скоростью v в направлении оси x , так что электрический вектор этой волны направлен по оси y и выражается уравнением

$$d_y = a \cos n \left(t - \frac{x}{v} \right),$$

а магнитный вектор направлен по оси z , то уравнения поля принимают вид:

$$\frac{\partial d_y}{\partial x} = -\frac{1}{c} \frac{\partial h_z}{\partial t};$$

$$-\frac{\partial h_z}{\partial x} = \frac{1}{c} \left(\rho \frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial d_y}{\partial t} \right)$$

и уравнение движения заряда принимает вид:

$$m \frac{d^2 v_y}{dt^2} = -f q_y + \rho d_y.$$

Это приводит к формуле, выражающей скорость распространения волны:

$$\frac{c^2}{v^2} = \frac{\rho^2}{f - mn^2} + 1.$$

Эта формула даёт электронную теорию дисперсии в неподвижном диэлектрике и совпадает с результатами Зельмейера и Гельмгольца.

При переходе к движущимся телам Лоренц полагает

$$\bar{d}' = \bar{d} + \frac{1}{c} [\bar{\omega} h]; \quad \bar{h}' = \bar{h} - \frac{1}{c} [\bar{\omega} d],$$

где $\bar{d}'$ и $\bar{h}'$ — поля в движущейся системе, $\bar{d}$ и $\bar{h}$ — в неподвижной (эфире).

Усредняя уравнения электронной теории, получаем, что среднее значение электрического микрополя равно напряжённости электрического макроскопического поля $\bar{E}$, среднее значение магнитного микрополя равно макроскопическому значению индукции $\bar{B}$.

Следовательно,

$$\bar{H}' = \bar{H} - \frac{1}{c} [\bar{\omega} \bar{E}];$$

$$\bar{E}' = \bar{E} + \frac{1}{c} [\bar{\omega} \bar{B}].$$

Уравнения электромагнитного поля для движущегося тела в теории Лоренца имеют вид (для осей в эфире):

$$\text{rot } \bar{H} = \frac{1}{c} \left(\frac{\partial \bar{E}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{P}}{\partial t} + \bar{j} + \rho \bar{\omega} + \text{rot } [\bar{P} \bar{\omega}] \right);$$

$$\text{rot } \bar{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \bar{H}}{\partial t};$$

$$\text{div } \bar{H} = 0; \quad \text{div } \bar{E} = \rho - \text{div } \bar{P}.$$

Мы видим, что, в отличие от теории Герца, магнитное поле движущегося диэлектрика определяется не величиной $[\bar{D} \bar{\omega}]$, а величиной $[\bar{P} \bar{\omega}]$. Поляризация в движущемся диэлектрике определяется не вектором $\bar{E}$, а векто-

ром $\bar{E}' = \bar{E} + \frac{1}{c} [\bar{w} \bar{B}]$. Скорость света в движущейся среде определяется теперь соотношением

$$\frac{c^2}{v'^2} = \frac{\rho^2}{f - mn^2} + 1 + 2 \frac{w}{v'} = \frac{c^2}{v^2} + 2 \frac{w}{v'}.$$

С точностью до величины второго порядка относительно $\frac{w}{c}$ получим:

$$\frac{c}{v'} = \frac{c}{v} + \frac{w}{c},$$

откуда

$$v' = v - \frac{wv^2}{c^2} = v - \frac{w}{\mu^2},$$

где μ — показатель преломления среды. Скорость света по отношению к эфиру равна $v' + w = v + \left(1 - \frac{1}{\mu^2}\right)w$.

Это известный результат Френеля о частичном увлечении эфира движущимися телами. В теории Лоренца он является следствием основных уравнений и гипотезы о неподвижности эфира.

Хотя уравнения Лоренца и не удовлетворяют теперь принципу относительности, однако Лоренц показал, что если ввести «местное» время $t' = t - \frac{1}{c^2} (\bar{w} \bar{R})$, то усреднённые уравнения электронной теории с точностью до величины первого порядка относительно $\frac{w}{c}$ в движущемся диэлектрике принимают вид:

$$\text{rot}' \bar{H}' = \frac{1}{c} \frac{\partial \epsilon E'}{\partial t'};$$

$$\text{div}' \bar{H}' = 0;$$

$$\text{rot}' \bar{E}' = -\frac{1}{c} \frac{\partial H'}{\partial t'};$$

$$\text{где} \quad \text{div}' \epsilon \bar{E}' = \rho,$$

$$\bar{H}' = \bar{H} - \frac{1}{c} [\bar{w} \bar{E}]; \quad \bar{E}' = \bar{E} + \frac{1}{c} [\bar{w} \bar{H}].$$

Но это означает, что если пренебречь членами второго порядка относительно $\frac{w}{c}$, то уравнения электромагнитного поля в движущемся диэлектрике совпадают с уравнениями Максвелла в неподвижном диэлектрике. С точностью до величины первого порядка электромагнитные процессы в теории Лоренца удовлетворяют принципу относительности.

Сопоставим теперь теории Герца и Лоренца. В теории Герца эфир движется вместе с весомыми телами. В теории Лоренца эфир неподвижен.

В теории Герца электромагнитные процессы удовлетворяют принципу относительности. В теории Лоренца электромагнитные процессы не удовлетворяют принципу относительности, а только приближённому принципу относительности первого порядка.



А. А. Эйхенвальд

В теории Герца скорость света в движущихся и покоящихся средах одинакова. В теории Лоренца скорость света в движущихся телах отличается от скорости света в покоящихся телах на величину $\left(1 - \frac{1}{n^2}\right)v$, т. е. совпадает со скоростью, вычисленной Френелем на основании гипотезы частичного увлечения эфира и определённой экспериментально Физо в 1859 г.

В теории Герца магнитное поле движущегося диэлектрика определяется величиной $[\vec{D}\vec{v}]$, в теории Лоренца — величиной $[\vec{P}\vec{w}]$.

Наконец, есть и различие в трактовке механических взаимодействий. Силы Максвелла-Герца, как определяемые натяжениями в эфире, удовлетворяют принципу действия и противодействия, и объём свободного эфира, в котором имеется поле, подвержен действию

механической силы в случае переменного поля. В теории Лоренца в отсутствие зарядов никаких сил, действующих на эфир, нет и силы взаимодействия не удовлетворяют третьему закону механики.

В 1900 г. Э. К о н предложил свою систему уравнений в движущихся средах, которая отличается от лоренцовой тем, что он предлагает для электрической и магнитной индукции в движущихся телах выражения:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} - \frac{1}{c} [\vec{w} \vec{H}]; \quad \vec{B} = \mu \vec{H} + \frac{1}{c} [\vec{w} \vec{E}].$$

Очевидно, что выбор между возможными концепциями мог быть сделан только на основе опыта. В области электродинамики в связи с этим приобрели большое значение эксперименты Роуланда и Рентгена. Однако они были недостаточны для получения определённых количественных выводов, и в частности опыт Рентгена был не в состоянии ответить на вопрос: какой же теории соответствует магнитное действие движущегося диэлектрика — теории Герца или теории Лоренца?

Ответ был получен в результате классических экспериментов русского физика Александра Александровича Эйхенвальда, проведённых им в 1901—1904 гг. по изучению магнитного поля движущихся тел. Его исследование «О магнитном действии тел, движущихся в электростатическом поле» появилось в 1904 г.

Эксперимент по наблюдению магнитного поля движущихся заряжённых проводников осуществлялся А. А. Эйхенвальдом следующим образом (см. рис. 131 и 131а). Два изготовленных из миканита диска *A* и *B* оклеивались по краям станиоловой полоской шириной 1,5 см (сами диски имели диаметр 25 см и толщину 0,6 мм). В одном месте станиоловой полоски был оставлен радиальный перерыв шириной 0,5 мм. Диски насаживались на оси, изготовленные из твёрдой латуни; оси покоятся на массивных станинах *G*₁ и *G*₂ из литой латуни, привинченных четырьмя болтами к латунной доске, которая в свою очередь покоится на каменном фундаменте.

Станину G_1 можно передвигать вдоль по доске и закреплять на различных расстояниях от G_2 . Каждая ось KL заканчивалась утолщением с шайбочкой L , к которой привинчивались диски. На каждой оси между парой подшипников помещался шкив O . Вращение осей с помощью зубчатых

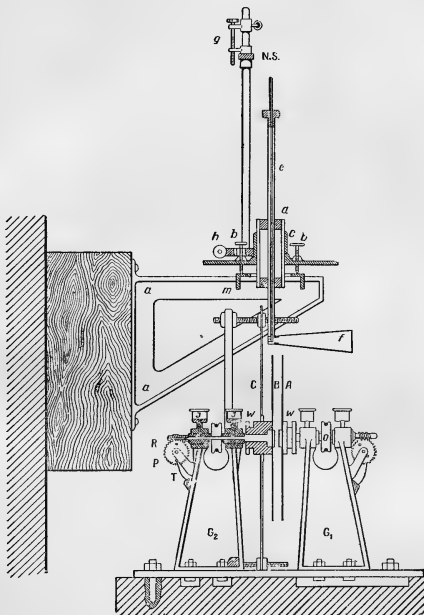


Рис. 131. Установка Эйхенвальда для исследования магнитного поля вращающихся заряженных тел

колес P , штифтиков K и контактной пружины T передаётся электромагнитному счётчику оборотов.

Диски A и B устанавливались в плоскости магнитного меридиана. Один из концов полоски соединён с кольцом, сидящим на эбонитовой втулке, и через него со скользящей щёткой w . Магнитное поле измеряется магнитометром, укреплённым независимо от прибора на консолях aa , перекрытых мостиком mm . На мостике привинчивался металлический цилиндр CC , в который плотно входил второй цилиндр d , скреплённый с медной обо-

лочкой *e* магнитной стрелки. Трубка *e* изготовлена электролитическим путём из меди, имеет диаметр 1 см и толщину стенок 1 мм. В трубке у дна было окошечко 5 × 5 мм, прикрытое зеркальной пластинкой и служащее

для наблюдения стрелки магнитометра. Медная воронка *f* служит электростатической защитой окошечка.

Магнитные системы магнитометров были двух типов: один состоял из шести стальных намагниченных стрелок длиной 3 мм, прикреплённых по три к верхнему и нижнему концам стеклянного волоска на расстоянии 10 см друг от друга. Вторая система состояла из двух стрелок на расстоянии 3 см друг от друга (рис. 132).

Опыт производится следующим образом. Диск *B* заряжается и приводится во вращение, причём диск помещается в заземлённую цинковую коробку *A*. Емкость системы и потенциал измеряются. Для контроля через полосу пропускается гальванический ток.

Опыты Эйхенвальда «доказывают непосредственно и притом с точностью около $\pm 5\%$ эквивалентность магнитного поля электрической конвекции и магнитного поля гальванического тока».

Эйхенвальд делает следующее заключение:

«Заряд, движущийся со скоростью, достигающей до 150 метров в секунду, образует вокруг себя магнитное поле, которое во всех отноше-

ниях, а именно по направлению, по величине, по распределению в пространстве и по своим индукционным действиям, эквивалентно магнитному полю гальванического тока, численная величина которого равна данной величине электрической конвекции»¹.

Далее Эйхенвальд с той же установкой перешёл к исследованию магнитного поля диэлектриков, движущихся в однородном электрическом поле. Наблюдения производились в таком порядке. Сначала между дисками *A* и *B*, образующими конденсатор, с охранными кольцами *D* и *E* (рис. 133),

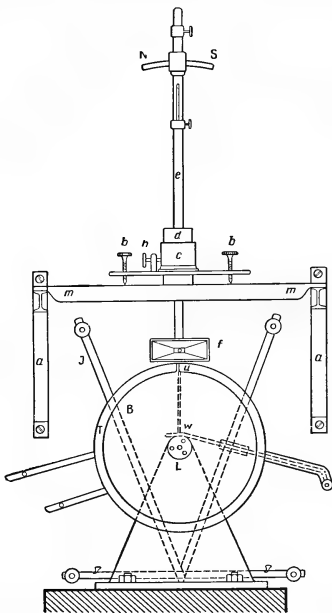


Рис. 131а

¹ А. А. Эйхенвальд, О магнитном действии..., стр. 47.

помещались пластинки диэлектрика из эбонита или стекла. Конденсатор заряжался, диск A вращался, диск B и прижатые к нему пластинки диэлектрика были неподвижны. Наблюдались отклонения стрелки магнитометра. «Эти опыты, — резюмирует Эйхенвальд, — ещё раз показывают, что электрическая конвекция во всём эквивалентна по магнитным действиям гальваническому току; но, кроме того, мы видим, что присутствие диэлектрика в поле движущегося проводника лишь постольку влияет на магнитные действия, поскольку увеличивается этим ёмкость и заряд проводника»¹.

Следующая серия опытов состояла в том, что пластины конденсатора были неподвижны, а промежуточный диэлектрик двигался. Обкладка AB конденсатора (рис. 133) сделана из цинка, диск $A'B'$ из эбонита и вращается вокруг горизонтальной оси между A и B . Из эбонита сделано также охранное кольцо, помещающееся между E и D .

Поверхностная плотность поляризационных зарядов («фигтивных») выражается формулой:

$$\sigma = -\frac{E - E_n}{4\pi} = \pm p.$$

Опыты показали, «что «фигтивный» заряд на движущемся

диэлектрике, по отношению к магнитным действиям, вполне эквивалентен «действительной» электрической конвекции или обыкновенному гальваническому току той же величины»².

Далее Эйхенвальд приводит во вращение всю систему, конденсатор и диэлектрик. Он получает при этом следующий замечательный результат: «Заряженный конденсатор, вращающийся вместе с диэлектриком, образует вокруг себя магнитное поле, которое, однако, при данной разности потенциалов обкладок, не зависит от материала диэлектрика. Эквивалентный ток в этом случае $i = CVn$ ». Когда вращались обкладки конденсатора, а диэлектрик был неподвижен, конвекционный ток был $i_1 = \epsilon CVn$. Если обкладка была неподвижна, а вращался диэлектрик, то конвекционный ток был $i_2 = -(\epsilon - 1) CVn$. Если вращается вся система, то $i = i_1 + i_2 = CVn$.

Эйхенвальд приводит и другую интерпретацию. «Магнитное поле в какой-нибудь неподвижной точке пространства может зависеть:

- а) от абсолютного движения заряда в пространстве; тогда эквивалентный ток будет $i = \epsilon CVn$;
- б) от движения заряда по отношению к диэлектрику, в нашем опыте $i = 0$;

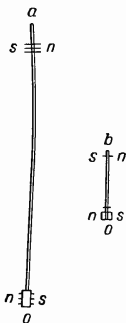


Рис. 132.
Магнитометры
Эйхенвальда

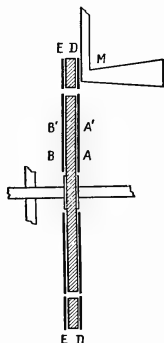


Рис. 133

¹ А. А. Эйхенвальд, О магнитном действии..., стр. 74.

² Там же, стр. 77.

с) от движения заряда по отношению к производимому самим этим зарядом полю; тогда $i = CVn$.

Действительно, в последнем случае мы должны себе представить заряд конденсатора ϵCV состоящим из двух частей: одна часть $(\epsilon - 1)CV$ образует электрическое поле в материи и вращается вместе с нею, а потому не даёт магнитного поля; другая часть CV вращается в неподвижном эфире¹. Обсуждая все три возможности, Эйхенвальд приходит к выводу, что его опыты «могут быть объяснены только такою теорией, которая принимает эфир неподвижным или которая приводит к понятию о неподвижном эфире; при этом мы должны принять эфир неподвижным не только вблизи движущихся тел, но и внутри самих движущихся диэлектриков».

Во всех описанных измерениях Эйхенвальд измерял субстанциональную скорость изменения электрического состояния. Он пожелал проверить и другое фундаментальное положение теории Максвелла — существование тока смещения, создающего магнитное поле. Для этого ему пришлось видоизменить расположение приборов так, чтобы можно было измерять локальное изменение во времени.

До него вопросом о токе смещения (если не считать экспериментов Герца, доказавших существование электромагнитных волн) занимались, кроме упомянутых нами Шиллера и Зилова, Рентген (1885), С. П. Томсон (1889) и В. Николаев (1895). В опыте Рентгена горизонтальный эбонитовый диск вращался между двумя неподвижными станиолевыми обкладками, имеющими вид широких колец. Нижняя обкладка разрезана на два полукольца, верхняя сплошная и в процессе опыта заземляется.

Оба полукольца нижней обкладки заряжаются противоположными зарядами, так что вращающийся эбонитовый диск, проходя перед разрезом, перезаряжается. Параллельно разрезу над верхней обкладкой помещается магнитная стрелка. Как указывает Рентген, «после длительных упражнений» он «мог почти безошибочно указывать направление отклонения стрелки». Понятно, что никаких количественных заключений Рентген сделать не мог.

В. Николаев пытался обнаружить пондеромоторные взаимодействия переменных токов смещения с токами проводимости.

В поле катушки, питаемой переменным током, помещалось кольцо из диэлектрика. Наблюдались движения этого кольца, аналогичные движению проводящего кольца в известном опыте Илайю Томсона. Опыт Николаева также носил чисто качественный характер.

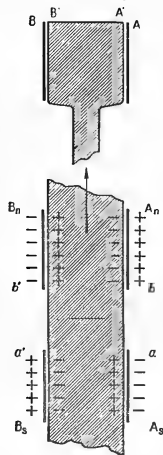


Рис. 134

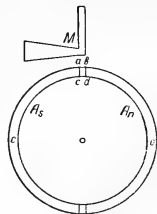


Рис. 135

¹ А. А. Эйхенвальд, О магнитном действии..., стр. 81.

А. А. Эйхенвальд видоизменил метод Рентгена (рис. 134). Вертикальный диск из эбонита $A'B'$ может вращаться вокруг горизонтальной оси между двумя неподвижными миканитовыми пластинками A и B , обклеенными кольцеобразными станиолевыми полосками. Диск имеет по краям толщину 1,25, в середине толщину 0,5, так что образуется эбонитовое кольцо толщиной 1,5 см (рис. 135). Зазоры между эбонитовым кольцом и обкладками равны 0,125 см каждый. Каждая обкладка состоит из двух полуколец, разделённых сверху и снизу промежутком в 1 см. Эти полукольца заряжались попарно противоположными зарядами, так что при вращении круга у ac и bd возникают токи смещения. Опыт показал, что «наблюдаемые магнитные действия несомненно принадлежат токам смещения». Далее Эйхенвальд показал, что все наблюдаемые в экспериментах токи — «конвекционные, кондукционные и токи смещения — всегда образуют собой замкнутые цепи», подтвердив тем самым важнейший постулат теории Максвелла.

В качестве основного следствия из своих опытов Эйхенвальд формулирует следующее положение:

«То, что мы называем в настоящее время мировым эфиром и что проникает собой все материальные тела, мы должны считать неподвижным даже внутри самой материи, находящейся в движении»¹.

Таким образом теория Герца несовместима с экспериментами Эйхенвальда. Теория Лоренца находится с ними в полном согласии. Она согласуется также с явлением абберации и опытом Физо, однако она не в состоянии объяснить опыт Майкельсона² без дополнительных гипотез.

Итоги и перспективы.

Итак, тридцатилетняя борьба за новую теорию электромагнитных явлений привела к её полной победе.

В сфере электрических и магнитных взаимодействий старая ньютонианская концепция силы оказалась несостоятельной. Идея Фарадея, что эти взаимодействия являются результатом скрытого материального процесса, полностью подтвердилась. Сам этот посредник был выведен Герцем из скрытого состояния, пойман и обнаружен вдали от своего источника. Взаимодействия между телами оказались обменом энергий и импульсом посредством электромагнитного поля. Этим был сделан огромный шаг в деле познания действительного механизма взаимодействия тел. С исключительной глубиной мысли Энгельс указывал: «мы ищем иной раз прибежища в слове «сила» не потому, что мы вполне познали закон, но именно потому, что мы его *не* познали, потому что мы еще *не* выяснили себе «довольно запутанных условий» этих явлений. Таким образом, прибегая к понятию силы, мы этим выражаем не наше знание, а **н е д о с т а т о ч н о с т ь** нашего знания о природе закона и о способе его действия»³.

Именно эта «недостаточность знания» заставила Кулона в XVIII в. искать выражения закона взаимодействия паэлектризованных тел и магнитных полюсов в виде закона дальнотействующей силы. В «довольно запутанных условиях» электродинамики Ампер, Нейман и Вебер искали выражения закона опять-таки в форме закона силы, действующей на расстоянии. Дальнейший прогресс на этом пути стал невозможным. Максвелл, пойдя по пути, указанному Фарадеем: искать механизма взаимодействия в среде, добился решающих успехов, подтвердив тем самым вывод Энгельса, что «во всякой области естествознания, даже в механике, делают шаг вперёд каждый раз, когда где-нибудь избавляются от слова **с и л а**»⁴.

¹ А. А. Эйхенвальд, О магнитном действии..., стр. 3.

² См. следующую главу.

³ Ф. Энгельс, Диалектика природы, 1955, стр. 55.

⁴ Там же, стр. 120.

Этих слов Энгельса ни Герц, ни кто другой из физиков не могли читать, они лежали ещё в его письменном столе. Но показательны, что последняя работа Герца как раз была посвящена задаче изгнания силы из механики. Эта же идея «скрытых движений» вдохновляла и Н. А. Умова; она стала господствующей в современной физике, где все виды взаимодействия распадаются с точки зрения концепции поля.

В тридцатилетней борьбе за существование теория Максвелла не только окрепла, но и развилась. Развился магнетический аппарат теории в руках Герца и Хевисайда, теория обогатилась учением о движении энергии (Умов и Пойнтинг), учением об электромагнитном импульсе и моменте импульса (Дж. Дж. Томсон, Лебедев, Садовский, Пуанкаре, Лоренц, Абрагам), возникла концепция электромагнитной массы (Дж. Дж. Томсон, О. Хевисайд) и, наконец, возникла электронная теория (Лоренц).

Возникновение же электронной теории поставило в порядок дня построение электромагнитной картины мира, как об этом писал в 1903 г. Лоренц в заключение своего очерка электронной теории.

«Хотя в эфире электромагнитные изменения состояния вообще распространяются со скоростью C , однако в электростатических явлениях влияние перемещения сказывается только во втором порядке. Это побудило меня к тому, чтобы и для гравитации допустить такое же посредничество эфира, как и в электрических силах (1900). Этим достигается то преимущество, что изменениям состояния эфира, порождающим силу тяжести, не требуется приписывать скорости распространения большей, чем скорости света, чтобы остаться в согласии с наблюдениями, которые в этой области не позволяют обнаружить влияния движения. Чтобы провести эту идею, я отправлялся от развитой Моссотти теории гравитации, по которой эта сила близко родственна электрическому действию.

Что также многие другие явления стоят в тесной связи с электромагнитными, что в них существенную роль играют электрические заряды мельчайших телесных частиц, обнаруживается с течением времени всё яснее и не требует здесь подтверждения примерами. В этом найден толчок к тому, чтобы рассматривать сущность всей материи прямо в электрических зарядах, в электронах¹ и представлять основные законы механики как следствия из принципов электронной теории². В этом ходе мыслей нет «истины», есть только «электромагнитная» масса — предположение, к которому поощряют дальнейшие исследования опытов Кауфмана и беккерелевских лучей, равно как и изложенные в предшествующих параграфах соображения»³.

Взятые Лоренцом в кавычки слова «истинная» и «электромагнитная» масса отражают тот господствующий взгляд на материю, согласно которому атрибутом материальности является неизменная ньютоновская механическая масса, а электричество рассматривалось как внешнее, не связанное с материей нематериальное свойство.

Как известно, переход к электромагнитному пониманию материи сопровождался кризисом физических воззрений. Ленин вскрыл причины этого кризиса и указал пути его преодоления. Глубокий анализ сложившейся в физике ситуации позволил ему разоблачить несостоятельность

¹ См., например, О. Лодж, Об электронах, М., 1902.

² В. В. И. О возможности электромагнитного обоснования механики, «Ann. Phys.», 1901, т. 5, стр. 501.

³ Н. А. Lorentz, Elektromagnetische Theorie, «Enzyk. d. exakt. Wissensch.», т. V, стр. 280.

попытки адептов электронной теории считать электрон последним «кирпичиком мироздания». «Электрон так же неисчерпаем, как и атом», — указывал Ленин. Это предвидение Ленина блестяще подтвердилось всем ходом дальнейшего развития физики.

Сообщая в 1954 г. об открытии возбуждённых нуклонов, английский физик С. Ф. Поуэлл писал в «Нейчур»:

«Мы вступаем в новую область, для которой должны быть установлены принципиально новые понятия; тем не менее представляется разумным рассматривать переход нуклона в возбуждённое состояние как результат изменения его внутренней структуры. Если это так, то мы начинаем проникать в то, что Максвелл назвал «странными слоями материального мира», т. е. начинаем проникать в мир нуклона. Представляется, что этот мир неисчерпаем».

Оправдывается предвидение Ленина, увидевшего в сложной обстановке ломки традиционных физических представлений грядущие успехи атомной физики и торжество диалектического материализма.

СОСТОЯНИЕ ФИЗИКИ В КОНЦЕ XIX в.

Общие замечания. Самым существенным итогом развития науки в XIX столетии является усиление её роли в жизни общества.

Это находит своё выражение в росте научных учреждений, сеть которых непрерывно расширяясь, охватывает весь земной шар. Вместе с тем растёт и армия научных работников, которых в свою очередь обслуживает армия лаборантов, препараторов, механиков и другого научно-вспомогательного персонала. Таким образом, общество, придавая важное значение науке для своего развития, уделяет всё более значительную часть людей и средств на науку.

Особенно усилилось значение физики, которая в связи с развитием электротехники начинает играть всё более важную роль в развитии производства. Приблизительные подсчёты показывают, что из общего числа учёных, работавших в области физических наук, начиная с момента возникновения опытного естествознания до конца XIX в., большая часть приходится на долю физиков, работавших в последнюю половину XIX столетия.

Необычайно выросло число периодических изданий, посвящённых физике и смежным с ней областям науки и техники. Уже в 1871 г. реферативный журнал «Успехи физики (нем.)» реферировал свыше 110 журналов; к концу века этот список увеличился. В 80-х годах появились специальные электрические журналы («Электричество» в России, «Электротехнише Цейтшрифт» в Германии и аналогичные органы в Англии и Франции). В одной только Германии к концу XIX столетия выходит более 30 периодических изданий по вопросам физики и смежных наук.

Одновременно возросло количество книг, монографий и учебных руководств по вопросам физики. К академическим и университетским издательствам прибавляются специальные фирмы по изданию научной литературы.

В России в конце столетия вышли первые томы обширного пятитомного курса физики О. Д. Хвольсона, получившего мировую известность.

Характерным признаком увеличившегося интереса общества к науке является рост сети научных обществ. Так, в России в 60-х годах возникло Русское физико-химическое общество, в котором с 1873 г. образовалась самостоятельная физическая секция с своим органом «Журнал Русского физико-химического общества» — часть физическая.

30 января 1880 г. был организован новый электротехнический отдел Русского технического общества, членами которого были такие выдающиеся деятели науки об электричестве, как П. Н. Яблочков, В. Н. Чиколев, Д. А. Лачинов, А. И. Лодыгин, А. И. Шпаковский и многие другие. В том же 1880 г. начал выходить журнал «Электричество» и была организована первая русская и мировая электротехническая выставка, на которой демонстрировались свечи Яблочкова и процесс их изготовления, дифференциальный

регулятор Чиколева, опыты по передаче электрической энергии Ф. А. Пироцкого и ряд других экспонатов.

В следующем 1881 г. была организована I Международная электротехническая выставка и созван I Международный конгресс электриков в Париже, вызвавшие большой общественный резонанс и послужившие сигналом к организации выставок и съездов в отдельных странах в последовавшие годы. Серия выставок завершилась в 1900 г. грандиозной Международной выставкой в Париже с многочисленными конгрессами при ней, в том числе и I Международным конгрессом физиков.

Международный конгресс физиков в Париже.

Задача конгресса состояла в том, чтобы составить общий обзор состояния физики к концу XIX, началу XX в. Представленные конгрессу доклады, напечатанные в трёх больших томах, и представляли собой картину состояния физики в конце XIX столетия. Среди участников конгресса были физики почти всех стран мира, всех частей света. Наряду с физиками в конгрессе принимали участие инженеры, промышленники, представители крупных фирм, издатели, врачи и другие лица. Сам по себе этот факт свидетельствовал о той роли, какую физика начинала играть в жизни общества.

Всего членов конгресса было более 800 человек, из них 500 человек приходилось на долю Франции. Конечно, это вовсе не означает, что Франция имела больше физиков. Из 500 французских членов конгресса 150 человек были профессорами университетов, колледжей и специальных высших учебных заведений, 86 человек были преподавателями лицеев, т. е. средних учебных заведений, остальные 264 были инженеры (104 человека), военные (18), промышленники (18), врачи и фармацевты (8), прочие учащиеся высших учебных заведений и частные лица.

Из известных учёных Францию представляли: Е. Амага, А. Беккерель, Р. Бенуа, Э. Бранли, Л. Кальете, А. Корню, П. Кюри, М. Кюри, П. Дюгем, Л. Фабри, Жанэ, П. Ланжевен, Г. Липпман, Масе де Лепинэ, Маскар, Муассан, Пенлеве, Пелла, Перо, Ж. Перрен, А. Пуанкаре. Виоль, П. Вейсс.

Русская делегация состояла из 49 человек. В её состав входили виднейшие учёные России: академики Б. Б. Голицын и М. А. Рыкачёв,

ЖУРНАЛЪ РУССКАГО ХИМИЧЕСКАГО ОБЩЕСТВА И ФИЗИЧЕСКАГО ОБЩЕСТВА

— Издательство: в Петербургскомъ Издательствѣ

Томъ VI

ОТДѢЛЪ ПЕРВЫЙ

Редакторъ: докторъ наукъ

Н. МИХАЙЛОВИЧЪ

Финансовый отдѣлъ: докторъ наукъ

Д. ВОЙНОВИЧЪ

ПЕТЕРБУРГЪ
Годъ 1874. Новый годъ 1875

Рис. 136. Титульный лист журнала Русского физико-химического общества



В. Ненст

профессора Московского университета П. Н. Лебедев, Н. А. Умов, А. П. Соколов, Э. Е. Лейст, профессор Московского института инж. путей сообщения А. А. Эйхенвальд, профессор МВТУ В. С. Щегляев, профессор Московского сельскохозяйственного института В. А. Михельсон, известный препаратор Московского университета И. Ф. Усагин.

Петербургские учёные, кроме упомянутых выше академиков, были представлены профессорами И. И. Боргманом, О. Д. Хвольсоном (университет), М. А. Шателеном (электротехнический институт), С. Я. Терешиним (медицинская академия), Н. А. Гезехусом (технологический институт). Кроме того, из Петербурга приехали Н. Г. Егоров (Главная палата мер и весов), А. Гершун (университет), В. К. Лебединский (университет),

В. С. Игнатовский (университет), Н. Георгиевский (технологический институт), А. С. Попов (минный офицерский класс в Кропштадте), Блумбах, Лебедев (Главная палата мер и весов), Забудский, Куприянов, Корольков (артиллерийская академия).

Из провинциальных высших учебных заведений приехали Д. А. Гольдгаммер (профессор Казанского университета), Ф. Капустин (профессор Томского университета), А. Ефимов (адъюнкт-профессор Томского технологического института), Г. Г. Де Метц (профессор Киевского университета), И. Осипов (профессор Харьковского университета), Н. Д. Пильчиков, Ф. Н. Шведов (профессора Одесского университета), Б. П. Вейнберг (приват-доцент Одесского университета), П. А. Зилов (профессор Варшавского университета), Г. Бернацкий (Варшавский университет).

Из Америки приехал почётный инженер-электрик Петербургского электротехнического института А. Н. Лодыгин, также выступавший на конгрессе как представитель русской науки.

Американская делегация состояла из 30 человек, среди них один из докладчиков конгресса, профессор университета Джона Гопкинса в Балтиморе Амес, изобретатель телефона Белл, член Смитсоновского института в Вашингтоне Ланглей, профессора университета в Кливленде Дейтон-Миллер и Морлей, Милликэн (Чикагский университет), электрик фирмы Джeneral-электрик Илийю Томсон и другие. С американской делегацией приехал и хорват Никола Тесла.

Почти равная по численности американской английская делегация, состоявшая из 32 человек, вместе со всеми колониями (кроме Канады) насчитывала в своём составе ряд крупных имён, во главе с почётным председателем конгресса Вильямом Томсоном (лордом Кельвином). В её состав входили: член Королевского общества Ч. Бойс, профессор Оксфордского университета Клифтон, профессор Лондонского королевского института Джемс Дьюар, профессор Кембриджского университета Дж. Лармор, профессор колледжа Мазона в Бирмингеме Дж.

Пойнтинг, секретарь Королевского общества А. Риккер, профессор Кембриджского университета Дж. Дж. Томсон, профессор Дублинского университета Дж. Фитцджеральд и другие.

Одна из наиболее многочисленных делегаций — немецкая — насчитывала 47 человек. В её состав входили: редактор журнала «Анален дер Физик» профессор П. Друде, президент Физико-технического института

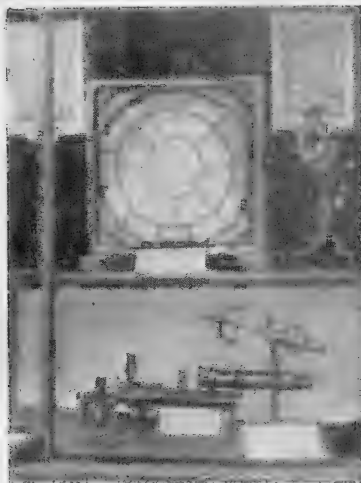


Рис. 136а. Приборы Френеля, демонстрировавшиеся на Парижском конгрессе физиков

Ф. Кольрауш, профессор Мюнхенского университета Грец, профессор Политехнической школы в Карлсруэ О. Леман, профессор Физико-технического института О. Люммер, профессор Лейпцигского университета Эттинген, профессор Берлинского университета Макс Планк, профессор Берлинского университета Э. Принсгейм, профессор Марбургского университета Ф. Рихарц, профессор Геттингенского университета Э. Рикке, профессор Берлинской высшей технической школы Г. Рубенс, профессор Геттингенского университета, редактор журнала «Физикалише Цейтшрифт» Г. Симон, профессор Геттингенского университета В. Фогт, профессор Берлинского университета Э. Варбург, профессор Вюрцбургского университета В. Вин, проф. М. Вин и другие.

Из 26 членов итальянской делегации назовём: П. Блазерна — профессора Римского университета члена Международного бюро мер и



С. Арреннус

весов Леви-Чивита (университет в Падуе), А. Ричи — профессора Болонского университета, А. Селла — профессора Римского университета, Виценти — директора Физического института Падуанского университета.

Лоскутная Австро-Венгрия была представлена делегацией в 21 человек. В состав её входили профессора Венского университета: Э. Мах, Ф. Эксернер, В. Ланг, член Венской академии наук профессор университета в Граце Л. Пфлаундер, профессор высшей школы в Инсбруке Г. Гаммерль. Этим собственно и исчерпывался список австрийских учёных.

Далее шли профессор Краковского университета: Витковский, Цибульский, Натансон, профессора Львовского университета: Мариан Смолуховский, Закр-

жевский, профессор Чешского университета в Праге Строхаль, университета в Загребе Дворжак. Семь человек было венгров во главе с президентом Венгерской академии наук профессором Будапештского университета Лорандом Этвешем.

В состав делегации Голландии входили: Босша, непрменный секретарь Голландского общества наук Вант-Гофф, Юлиус (профессор Утрехтского университета), Г. А. Лорентц (профессор Лейденского университета), Ван-дер-Ваальс (профессор Амстердамского университета), П. Зеeman (профессор Амстердамского университета) и несколько других менее известных имён.

Маленькая Бельгия была представлена 17 делегатами, в том числе: Э. Жераром — директором Льежского института электричества, Э. Руссо — профессором Брюссельского университета, В. Спрингом — профессором Льежского университета.

Швеция и Норвегия были представлены К. Биркеландом — профессором университета в Христиании (Осло), В. Бьеркнесом — профессором Стокгольмского университета, Ридбергом — профессором Лундского университета, С. Аррениусом — профессором и ректором Стокгольмского университета.

Неожиданно много делегатов (27) прислала Швейцария. Из швейцарских учёных назовём: Шапюи — представителя Международного бюро мер и весов, профессора Лозанского университета Г. Дюфур, профессора Фрейбургского университета Гокеля, профессора Женевского университета Р. Пикте.

Дания прислала трёх делегатов во главе с профессором Копенгагенского политехнического института Г. Христиансеном.

Остальные страны были представлены так: Румыния пятью делегатами, Япония — четырьмя, Люксембург — тремя, Ирландия — двумя, Индия — двумя, Канада — двумя, Греция, Испания, Финляндия — по одному.

Таким образом на конгрессе присутствовал почти весь основной состав деятелей физической науки земного шара, работавших в конце XIX столетия.

На конгрессе работало семь секций: 1) общие вопросы, единицы, вопросы обучения, 2) механическая и молекулярная физика, 3) оптика и термодинамика, 4) электричество и магнетизм, 5) магнито-оптика, катодные лучи, излучение радия, т. е. вопросы только что народившейся атомной физики, 6) космическая физика, 7) биологическая физика. Три последние секции — результат развития физики последней трети XIX в.

Общие вопросы физики.

В первой секции были заслушаны доклады: А. Пуанкаре «Соотношение между математической и опытной физикой», Пелла «Национальные лаборатории», Бенуа «Точность метрологических определений», Гильома «Обзор различных предложений относительно установления единиц», Массе де Лепинз «Метрологические определения интернациональным способом», Шаппюи «Термометрические шкалы», Барю «Пирометрия», Амеса «Механический эквивалент теплоты», Гриффитса «Единица теплоты», Гюи «Эталон электродвижущей силы», Ледюка «Электрохимический эквивалент серебра», Бойса «Постоянная тяготения», Этвеша «Изучение поверхностей уровня», Буржуа (Bourgeois) «Тяжесть на поверхности земного шара», Виоля «Скорость звука».

Остановимся на докладе Пуанкаре, отражающем ту идейную борьбу в теоретической физике, о которой мы уже говорили в разделе, посвящённом ей. По своим устремлениям Пуанкаре принадлежал к махистскому направлению, однако практика науки заставляет его высказать ряд верных мыслей по вопросу о соотношении математической и экспериментальной физики. Он указывает, что математика глубоко проникает в физику, она доставляет физику «единственный язык, на котором он может говорить». Далее, устанавливаемые физикой законы хотя и вытекают из опыта, но они «не вытекают из него непосредственно». Чтобы получить закон, необходимо обобщение. Математика доставляет физику возможность широкого обобщения «на основе глубоких чисто математических аналогий». В качестве примера Пуанкаре приводит обобщение Ньютоном законов Кеплера: «оба закона отличаются друг от друга лишь по форме, от одного из них переходят к другому при помощи простого дифференцирования. И, однако, из закона Ньютона можно вывести при помощи непосредственного обобщения все явления пертурбации, всю небесную механику. Паоборот, если бы был сохранён третий закон в том виде, как его изложил Кеплер, то на орбиты возмущённых движений планет, — на эти сложные кривые, уравнения которых никто никогда не написал, — не могли бы взглянуть как на естественное обобщение эллипса. Усовершенствование методов наблюдения могло бы тогда привести лишь к вере в хаос».

Приведённый Пуанкаре пример действительно ярко иллюстрирует силу научной абстракции, с помощью которой действительность познаётся глубже и вернее.

Второй пример, которым Пуанкаре иллюстрирует значение математических обобщений для физики, касается уравнений Максвелла. Пример этот очень глубокий; действительно, широкое обобщение Максвеллом фактов электродинамики позволило глубже, полнее и вернее познать закон электромагнитных процессов, более того, — как мы видели в предыдущей главе, — дало неизмеримо больше, чем простое описание известных фактов; оно проложило путь к познанию нового физического объекта — электромагнитного поля, привело к существенно новым открытиям в физике и технике. Пуанкаре, однако, не в состоянии материалистически объяснить этот факт.

«Известно, — говорит он, — что априорные взгляды Максвелла в течение двадцати лет ожидали опытного подтверждения, или, если хотите,

Максвелл на двадцать лет опередил опыт. Каким образом была одержана такая победа?» Игнорируя высказывания самого Максвелла, искажая действительную историю открытия, заключающегося в том, что Максвелл, разрабатывая материалистические идеи Фарадея, искал и нашёл форму математического описания фактов электродинамики, в которой была бы учтена решающая роль среды в электрических и магнитных взаимодействиях, Пуанкаре отвечает на поставленный им вопрос субъективистски. Пуанкаре усматривает причину успеха Максвелла в том, что он, видите ли, «глубоко был проникнут чувством симметрии». Нет необходимости доказывать несостоятельность этого объяснения, мы видели действительный путь возникновения и развития теории Максвелла. Наконец, Пуанкаре иллюстрирует важность математики, как орудия физического познания, и примером простой математической аналогии.

«Третий пример покажет нам сейчас, что мы можем замечать математические аналогии между явлениями, которые с точки зрения физики не имеют никакой связи ни внешней, ни действительной, — аналогии такого рода, что законы одного из этих явлений помогают нам угадывать законы другого. Одно и то же уравнение, а именно уравнение Лапласа, встречается в теории ньютонова притяжения, в теории движения жидкостей, в теории электрических и магнитных потенциалов, в теории распространения теплоты и ещё во многих других теориях». Подобного рода аналогии «разъясняют друг друга, заимствуя друг у друга язык».

«Таким образом, математические аналогии не только дают нам возможность предвидеть аналогии физические, но не перестают быть полезными даже тогда, когда последних нет налицо».

Указав на значение математики для физики, Пуанкаре обращается к раскрытию значения физики для математики. Он совершенно правильно говорит об этом значении:

«Нужно было бы совершенно забыть историю науки, чтобы не вспомнить, что желание познать природу имело весьма постоянное и в высшей степени благоприятное влияние на развитие математики».

Математика получает материал для решения от физики. Без этого импульса, получаемого ею от природы, математика не могла бы существовать.

«Комбинаций, которые могут образовывать числа и символы, бесконечное множество. Как выбрать нам среди этого множества те, которые достойны нашего внимания? Позволим ли мы себе руководиться исключительно нашим капризом? Но каприз — не говоря уже о том, что и он рано или поздно может, так сказать, переутомиться — увлёт бы нас, без сомнения, в разные стороны, далеко разрозненные одни от других, и мы скоро перестали бы понимать друг друга». Следовательно, самая абстрактная наука — математика — немыслима как наука, если она не имеет дело с действительностью, с реальными отношениями, а только с созданными ею для себя символами. Эту постоянную связь с действительностью математика осуществляет через физику.

«... физика, без сомнения, не даст нам заблудиться, но, кроме того, она ещё предохранит нас от гораздо более страшной опасности: она помещает нас вращаться без остановки в одном и том же круге. Физика, как это доказывает история науки, не только принудила нас произвести определённый выбор между представляющимися в изобилии задачами, но она заставила нас заниматься такими задачами, о которых без неё мы никогда бы не подумали. Как бы ни было разнообразно воображение человека, природа ещё в тысячу раз богаче».

«Физика не только даёт нам повод решать задачи, но и помогает отыскивать путь для их решения. Делает она это разными способами: иногда даёт нам возможность предвидеть решение, иногда же подсказывает методы рассуждения». В обращении к природе кроется и источник так называемой интуиции, угадывания решения. Таково прямое значение физики для математики. Физика и математика, указывает Пуанкаре, «не суть лишь определённые державы, поддерживаемые отношениями доброго соседства, они взаимно проникают друг в друга, и дух их один и тот же»¹.

Нетрудно сделать вывод из рассуждений Пуанкаре, что этот один и тот же дух обусловлен одним и тем же источником: действительностью, природой. И это, конечно, правильно. Доклад Пуанкаре, несмотря на наличие в нём некоторых сомнительных высказываний, очень симптоматичен и в общем правильно определил взаимоотношения математики и физики.



Рис. 137. Эталон метра

Установка докладчика на необходимость укрепления и развития связи между этими науками, доходящей до взаимопроникновения теоретической физики и математики, оправдалась последующим развитием науки. Но она вместе с тем явилась и источником излишней математизации физики и связанных с этим идеалистических извращений. Тенденция к математизации физики появилась ещё в начале рассматриваемого периода. Об этом сообщает А. Шустер: «К тому времени (т. е. 70-м годам) уже появилась тенденция скрывать неведение под покров математических формул, но её ещё открыто не защищали и учили ещё студентов создавать себе определённые представления о самих процессах природы».

Следующая серия докладов (Пелла, Бенуа, Гильома и др.) посвящена метрологическим вопросам.

Одной из важнейших особенностей развития физики в конце XIX в. является борьба за повышение точности измерений и вообще за культуру измерения. Важность рациональных методов измерения величин, установления продуманной системы единиц осознаётся физиками всего мира. Максвелл писал в 1871 г.: «наиболее важной ступенью развития науки является измерение величин». Учёные деятельно борются за введение интернациональной системы мер. В 1869 г. русский академик Б. С. Якоби предложил учредить Международную комиссию мер и весов. Инициатива Якоби получила одобрение научных кругов. В Париже была учреждена Международная метрическая комиссия, которая в 1872 г. приняла следующие рекомендации:

1. В отношении м е т р а :

1) В качестве исходного международного метра будет принят архивный метр в его современном состоянии.

2) Уравнение для нового международного метра будет выведено из длины архивного метра.

¹ А. Пуанкаре, Связь между анализом и математической физикой, М., 1900, стр. 2 10.

3) Длина международного метра будет нанесена на масштабе граничными штрихами. Будут изготовлены идентичные копии масштаба длиной в метр и их уравнения относительно международного метра будут определены Комиссией.

4) Международный метр имеет длину одного метра при 0°C .

5) Масштабы будут изготовлены из сплава, который состоит из 90 частей платины и 10 частей иридия с допустимой ошибкой в составе смеси до $\pm 2\%$.

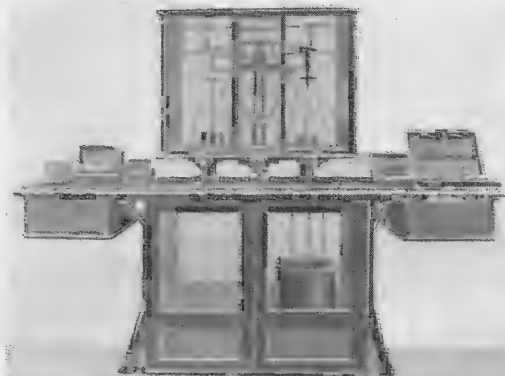


Рис. 138. Аналитические весы конца XIX в.

6) Масштабы, число и форма которых будут определены Комиссией, будут изготовлены из стержня, полученного из цельного куска.

7) Стержни будут много дней прокаливаться при высокой температуре.

8) Стержни, на которых отмечается длина одного метра, имеют 102 см длины и имеют приданную г. Треска форму поперечного сечения.

9) Стержни, из которых изготавливаются масштабы длиной 1 м, получают ту же форму поперечного сечения; их концы будут округлены сферической поверхностью радиуса 1 м.

10) Каждому международному метрическому масштабу будут приданы два ртутных термометра, тщательно выверенные с воздушным термометром.

11) Будет использован метод Физо, чтобы определить расширение сплава из платины и иридия, употребляемого для изготовления масштабов.

12) Сам метрический масштаб будет использован для того, чтобы определить абсолютный коэффициент расширения для одного метра; измерения будут проведены для каждого масштаба особо и по крайней мере для пяти различных температур между 0 и 40°C .

13) Относительное сравнение метрических масштабов друг с другом делается по крайней мере для трёх температур, лежащих между теми же границами.

14) Чтобы определить уравнения для различных масштабов, будут применены все известные до сих пор и проверенные средства сравнения.

II. В отношении к и л о г р а м м а.

1) Международный килограмм будет выведен из архивного килограмма в его современном состоянии.

2) Его вес будет приведён к безвоздушному пространству.

3) Он будет изготовлен из того же сплава (см. I,5), как и международный метр.

4) Сплав будет сплавлен и отлит в форме цилиндра, который затем прокаливается и подвергается механическим операциям, которые окажутся подходящими, чтобы сделать массу возможно более однородной.

5) Форма международного килограмма должна быть такой же, как и архивного килограмма, т. е. цилиндр, высота которого равна диаметру и края которого слабо обточены.

6) Интернациональная комиссия определит вес одного кубического дециметра воды.

7) Кроме того, употреблявшиеся до сих пор веса должны быть сконструированы заново согласно требованию наибольшей точности.

8) Объёмы всех килограммов будут определены по гидростатическому методу, однако архивный килограмм не будет помещаться ни в воду, ни в безвоздушное пространство, прежде чем не будут закончены все другие операции.

9) Чтобы определить вес нового килограмма в безвоздушном пространстве в отношении к архивному килограмму, будут использованы два вспомогательных килограмма, которые будут иметь по возможности одинаковый вес и одинаковый объём с архивным килограммом. Кроме того, каждый из новых килограммов будет сравниваться с архивным в воздухе.

10) После изготовления международного килограмма все другие будут сравниваться с ним, как в воздухе, так и в безвоздушном пространстве. Из всех этих наблюдений будут выведены уравнения для различных килограммов-весов. Проведение принятых решений, изготовление новых масштабов метра и килограмма и сравнение их с архивными, равно как и другие дела переданы французским членам Комиссии и постоянному Комитету, состоящему из 12 членов — представителей различных стран. Кроме того, рекомендовано правительствам учредить Международное бюро мер и весов в Париже.

Эти рекомендации были приняты. 20 мая 1875 г. в Севре в павильоне Бретейль было открыто Международное бюро мер и весов, которое и занялось проведением в жизнь решений Интернациональной метрической комиссии. Новые эталоны были изготовлены из рекомендованного сплава платины и иридия и имели установленную форму. Исследование целесообразной формы метра проводил учёный секретарь Комиссии Треска. Он предложил, вместо того чтобы сохранить форму архивного метра (стержень прямоугольного сечения $25\text{ мм} \times 1\text{ мм}$) или английского ярда (стержень квадратного сечения со стороной 25 мм), принять стержень, сечение которого имеет форму буквы X. Сечение имеет такую форму, чтобы оно могло быть вписано в квадрат так, чтобы поверхность a , на которой наносятся деления масштаба, лежала на половине высоты. При установлении такой формы исходили из требований, чтобы масштаб был возможно более жёстким, чтобы определённая длина лежала возможно близко к линии,

проходящей через центры тяжести всех поперечных сечений, и чтобы вызванное трением об опору искривление масштаба было минимальным. Комиссия, как мы видели, рекомендовала форму, исследованную Треска (см. рис. 137).

С изготовленных Международным бюро эталонов была изготовлена 31 копия, эти копии 26 сентября 1891 г. были распределены по жребью между двадцатью государствами, участвовавшими в учреждении Международного бюро. Россия получила две копии метра — № 11 и № 28. Уравнения этих копий следующие:

$$\begin{aligned}\text{метр № 11} &= 1 \text{ м} - 0,5 \text{ мм} + [8,650t + 0,00100t^2]; \\ \text{метр № 28} &= 1 \text{ м} + 0,5 \text{ мм} + [8,650t + 0,00100t^2],\end{aligned}$$

где t — температура в градусах Цельсия. Как видим, среднее из обеих длин при 0°C в точности равняется 1 м.

Уравнения копий килограммов № 12 и № 26, полученных Россией, следующие:

$$\begin{aligned}\text{кг № 12 объём } 46,407 \text{ см}^3, \text{ масса } 1 \text{ кг} + 0,00000 \text{ мг} \\ \text{кг № 26 объём } 46,510 \text{ см}^3, \text{ масса } 1 \text{ кг} - 0,0032 \dots\end{aligned}$$

Неутомимую и эффективную деятельность по развитию научной метрологии в России развил Д. И. Менделеев, по инициативе которого существовавшее с 1845 г. дело мер и весов было реорганизовано 8 июня 1893 г. в Главную палату мер и весов (ныне Всесоюзный научно-исследовательский институт метрологии и стандартизации). Ставший первым президентом палаты Д. И. Менделеев требовал, чтобы «порученное ему возобновление прототипов не только уступало позднейшим иностранцам, но и внесло свой вклад в область точных измерений»¹. Он считал своим долгом, «содействовать увеличению точности взвешиваний от миллионных частей груза до миллиардных их долей». С этой целью тщательно изучались возможные влияния на точность результатов; в измёрительной практике широкое распространение получила оптика: микроскопы, отсчётные трубы. Д. И. Менделеев так описывает процедуру точного взвешивания в Палате мер и весов:

«Наблюдатель находится отделённым от весов наглухо перегородкой, состоящей из деревянной доски толщиной около 12 мм, обитой с обеих сторон листами жести, и из двух картонных листов, находящихся перед и позади деревянной доски на некотором от неё расстоянии и оклеенных внутри станиолем. Пространство между листами картона и жестяной обшивкой заполнено воздухом. По опытам, проведенным в Главной палате, подобная перегородка, способная продолжительное время задерживать лучистую теплоту, неизбежно испускаемую телом наблюдателя и производящую своё влияние даже при расстоянии в 4 м, а это, как показывает опыт, может сильно влиять на точности взвешиваний и оттого-то Главной палатой точность взвешиваний превосходит достигнутую при других возобновлениях, например в Англии и Франции».

Подобного рода манипуляции не были мелочным педантизмом; физики всё яснее ощущали, что они «должны искать будущие открытия в шестом десятичном знаке». Д. И. Менделеев указывал, что точные измерения «не только служат своим специальным целям, но и дают немаловажный вклад в естественную философию»².

¹ Н. А. Шосткин, Д. И. Менделеев и проблемы измерения, М., 1947, стр. 40.

² Там же, стр. 82.

Действительно, уже сама задача выбора основных эталонов выдвигала проблемы, связанные с глубоким проникновением в природу материи.

В 1870 г. на собрании английских естествоиспытателей в Ливерпуле Максвелл обратил внимание на то, что, как вытекает из спектроскопических исследований, молекула раскалённого водорода, как земного, так и бесконечно удалённого, излучает устойчивые колебания. Такие устойчивые колебания по идее Максвелла особенно пригодны для получения устойчивых эталонов. Максвелл, в соответствии с своей общей точкой зрения на атомы и молекулы, связывал эту устойчивость с неизменностью самих молекул и поэтому рекомендовал для получения устойчивых эталонов обращаться не к нашей планете и её размерам, периоду обращения и массе, а к длинам волн, периоду колебаний и массе этих вечных и неизменных молекул.

В этом направлении и были поставлены исследования Майкельсона и Бенуа, имеющие целью сравнение метра с длинами световых волн. Эти исследования проводились с замечательным прибором — интерферометром Майкельсона. Возникновение этого прибора, позволяющего давать небывалую точность в измерении длины, опять-таки связано с одной из глубочайших проблем «естественной философии». Речь шла об обнаружении влияния движения Земли на распространение света в эфире. Возможность обнаружения такого влияния была обсуждена Максвеллом в его письме к редактору «Нейчур», написанному им незадолго до смерти в 1879 г.

Если допустить, что свет — волновой процесс в неподвижном эфире, то тогда в направлении движения Земли и в противоположном направлении скорость светового луча должна быть различной. Однако во всех «земных методах (не астрономических. — П. К.) определения скорости света, — пишет Максвелл, — свет возвращается по тому же пути, так что скорость Земли по отношению к эфиру будет изменяться за время двойного прохождения на величину, зависящую от квадрата (подчёркнуто мной. — П. К.) отношения скорости Земли и скорости света, а это слишком мало, чтобы быть наблюдаемым». Это посмертное письмо Максвелла было опубликовано в «Нейчур» в январе 1880 г., а уже в следующем 1881 г. Майкельсон осуществлял опыт Максвелла с изобретённым им интерферометром. Так теоретическая проблема подтолкнула экспериментатора на решение, казалось бы, неразрешимой задачи — достигнуть точности измерения порядка 10^{-8} измеряемой величины. Достигнув такой точности, Майкельсон (совместно с Бенуа) приступил в 1895 г. к сравнению международного метра с длиной волны.

Мы не описываем здесь устройства хорошо известного интерферометра Майкельсона. Прежде всего Майкельсон исследовал однородность различных источников света, оценивая её максимальной разностью хода лучей, при которой ещё наблюдается чётливая интерференционная картина. В качестве источника света служила разрядная трубка с весьма разрежёнными парами того или иного элемента. Наиболее монохроматичной оказалась трубка с парами кадмия¹. В представленной схеме (см. рис. 139) лучи от трубки проходят через спектроскоп *bcd*, и излучение определённого сорта («спектральная линия») направляется параллельным пучком на пластинку *e* интерферометра. С помощью установочных винтов зеркало *g* устанавливается так, чтобы его изображение в *f* (плоскость референции) было параллельно подвижному зеркалу *f*.

¹ Современные исследования показали, что, несмотря на наличие у красной линии кадмия значительной ширины и тонкой структуры, выбор её в качестве эталона оправдан. См. статью М. Ф. Романовой, журн. У. Ф. Н., т. XXVII, 1952, стр. 2.

Получившаяся интерференционная картина наблюдается в трубу h . Вначале включают источник белого цвета и, фокусируя трубу на плоскость референции, наблюдают интерференционную картину в виде полос (так называемой «линии равной толщины»). Наличие чёрной полосы свидетельствует о совпадении плоскости интерференции зеркала g с плоскостью зеркала f .

Затем включается монохроматический источник, труба h устанавливается на бесконечность: наблюдают интерференционную картину линий равного наклона в виде светлых и тёмных колец.

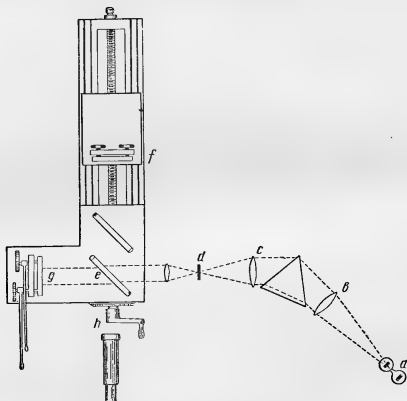


Рис. 139. Схема опыта Майкельсона по проверке однородности источника

Перемещая подвижное зеркало f параллельно самому себе и параллельно плоскости референции, увеличивают разность хода; при этом в поле зрения трубы будут наблюдаться периодические исчезновения и появления колец.

Таким путём Майкельсон показал, что красная линия кадмия соответствует наибольшей монохроматичности, которой соответствует максимальная разность хода до полумиллиона волн. Это обстоятельство и побудило Майкельсона принять длину волны красной линии кадмия в качестве естественной неизменной единицы длины, с которой он и сравнивал длину прототипа метра.

Самый процесс измерения сводился к следующим манипуляциям. Прежде всего были изготовлены так называемые «нормали». Основная нормаль имела длину около 10 см. На медном фундаменте одна на другой на расстоянии около 10 см помещались две посеребрённые, тщательно отполированные стеклянные плоскопараллельные пластины, устанавливаемые строго параллельно друг другу. Площадь пластин — примерно $1/4$ площади

зеркал интерферометра. Нормаль устанавливается на салазках, позволяющих перемещать её параллельно самой себе.

Затем изготавливается вторая нормаль, равная $1/2$ длины первой; третья, равная $1/2$ длины второй, и т. д. Последняя, девятая нормаль имеет

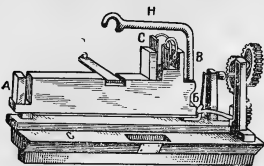


Рис. 140. Нормаль Майкельсона

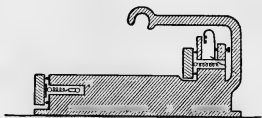


Рис. 140а. Нормаль Майкельсона

длину около $1/2$ мм, и с ней начинают измерения. Для этого нормаль устанавливают так, чтобы плоскости её были параллельны плоскости f , и последнюю перемещают до совпадения с передней плоскостью нормали (это узнаётся по появлению тёмной полосы в интерференционной картине линий равной толщины при освещении белым светом).

Затем плоскость f перемещают до совпадения с верхней плоскостью нормали, считая исчезающие кольца в интерференционной картине линий равного наклона при освещении монохроматическим светом.

Таким образом оказалось, что длина первой нормали (наименьшей) равна 1212,37 волн красного излучения кадмия, 1534,79 зелёного и 1626,18 синего. Затем эта нормаль сравнивается со второй. Сравнение производится следующим образом. Обе нормали, короткая nm' и длинная nn' , устанавливаются параллельно друг другу (рис. 141), так, чтобы обе плоскости m , n совпали с плоскостью зеркала. Это опять-таки узнаётся по наличию чёрных полос в интерференционной картине при освещении белым светом. Затем плоскость d сдвигают до совпадения с задней плоскостью m' первой нормали. Далее передвигают нормаль так, чтобы переднее зеркало совпало с новым положением зеркала d , и, наконец, считают число волн (обычно дробное) до совпадения d с задней поверхностью n' второй нормали. Таким же образом вторая нормаль сравнивается с третьей и т. д.

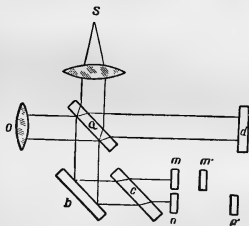


Рис. 141. Схема опыта Майкельсона по сравнению нормалей

Последняя, дециметровая нормаль сравнивается с вспомогательным метром, а этот последний сравнивается с прототипом, путём обычных отсчётов с помощью микроскопа, с той точностью, с какой обычно сравниваются прототип с копией. Весь прибор помещается в ящике для предохранения от колебаний температуры и воздушных течений. «Выполнение всей вышеизложенной работы заняло почти год. Как окончательный результат было получено, что число световых волн, содержащихся в нормальном

метре для красных лучей кадмия, равно 1553163,5, для зелёных 1966249,7 и для синих 2083372,1, причём все эти числа относятся к воздуху, находящемуся при температуре в 15°C и под нормальным атмосферным давлением» (Майкельсон). При выполнении работы требовалось обеспечить большую точность механической части: салазок, установочных винтов, винта, перемещающего подвижное зеркало, и т. д. Сотрудничество точной механики и оптики ярко проявляется в этой работе.

Интерференционный метод измерения длин и вытекающая отсюда возможность эталонизирования метра световыми волнами полностью оправдали себя, как видно из следующей таблицы:

Длина волны красной линии кадмия в ангстремах

Годы	Авторы	Оригинальные данные, приводимые авторами	Исправленные данные, приведенные к нормальным условиям
1895	Майкельсон и Бенуа	6438,4722	6438,4691
1905/6	Бенуа, Фабри и Перо	6438,4696	6438,4703
1927	Ватанабе и Иманзуми	6438,4685	6438,4682
1933	Сирс и Барелл	6438,4711	6438,4713
1934/5	Сирс и Барелл	6438,4708	6438,4709
1933	Кестерс и Лампе	6438,4672	6438,4689
1935	Кестерс и Лампе	6438,4685	6438,4690
1937	Кестерс и Лампе	6438,4700	6438,4700
1940/41	Романова, Варлих, Карташев и Батарчук	6438,4687	6438,4687

Нормальные условия принимались следующими: сухой воздух, содержащий 0,03% CO_2 , имеющий температуру 15°C и давление 760 мм рт. ст. Средняя длина волны красной линии кадмия при нормальных условиях оказывается равной:

$$\lambda = 6438,4696 \text{ \AA}, \text{ со средней квадратичной погрешностью } s = 0,0004 \text{ \AA}.$$

Советские метрологи разработали в 1940 г. в ВНИИМ большой горизонтальный интерферометр оригинальной конструкции для сравнения длин с длиной световой волны. Отсылая читателя за подробностями к статье М. Ф. Романовой (У. Ф. Н., т. XLVII, вып. 2, 1952), приведём здесь конечные выводы автора:

«На основании опыта наших измерений мы предлагаем немедленно принять новое определение метра, положив метр равным установленному числу длин волн основной световой волны. В качестве основной длины световой волны следует пока сохранить длину волны красной линии кадмия». «Такой переход даёт ряд преимуществ в отношении поддержания единицы длины, воспроизводимой мерами, и позволяет вести дальнейшие работы по увеличению точности измерения как концевых, так и штриховых мер, так как уже красная линия кадмия обеспечивает возможность увеличения точности измерения последних приблизительно в 5 раз». «При переходе на новую более монохроматичную линию понадобится только возможно более точно сравнивать длину волны новой линии с длиной волны красной линии кадмия, подобно тому, как это делается в настоящее время в отношении зелёной линии ртути Hg^{198} ».

«Значение длины метра, определяемого световой волной, или «светового метра», при переходе от красной линии кадмия к новой линии не из-

менится, но будет уточнено». «Достигнутое в нашей стране положение, представляющее фактический переход на «световой метр», позволяет нам поддерживать неизменность единицы длины не только в нашей стране, но и в международном масштабе, не прибегая к сравнениям нашего государственного эталона метра с эталонами метра других стран».

Сообщим здесь, что государственным эталоном метра СССР считается эталон № 28, длина которого по современным измерениям составляет при 0°C $1\text{ м} \pm 0,71\text{ мк}$.

К тому, что было сказано выше об успехах измерительной техники и о борьбе за единую систему мер, остаётся добавить немного. Отметим, что конгресс из-за разногласия между представителями Германского физико-технического института и представителями Международного бюро мер и весов в Севре не пришёл к соглашению о системе единиц. Что же касается достигнутой точности метрологических определений, то сконструированные специальные весы, построенные для таких определений, позволяют определить изменение силы тяжести при изменении высоты тела на 2 см. По выражению Виннера, «такими весами можно взвесить саму

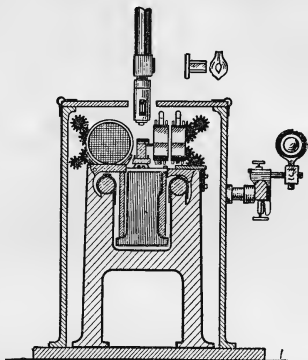


Рис. 141a. Деталь прибора Майкельсона

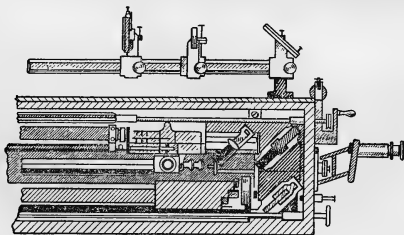


Рис. 141b. Деталь прибора Майкельсона

землю». Не ограничиваясь такой чувствительностью, Варбург и Имори построили микровесы, с помощью которых они обнаружили существование на стёклах невидимой водяной плёнки толщиной в одну пятиллионную миллиметра.

Больших результатов добился Бойс и в особенности Этвеш в определении гравитационной постоянной. Бойс konstruirовал крутильные весы с тончайшей кварцевой нитью, которые он изготовлял, прикрепляя маленький крючок расплавленного кварца к стреле и тетиве туго натянутого лука; при выстреле кварц вытягивался в тонкую нить. Работая с чувствительными крутильными весами, венгерский физик Этвеш с большой точностью подтвердил равенство инертной и гравитационной массы — факт, имеющий важное принципиальное значение.

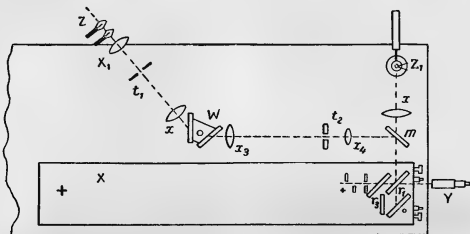


Рис. 142. Общее расположение установки Майкельсона и Бенуа по сравнению метра с длиной волны

Остановимся на этих работах Этвеша. Предварительно сообщим биографические сведения.

В Будапештском университете Этвеш изучал право, однако его увлекли естественные науки, и он с особым интересом стал изучать химию.

Пребывание в Германии и в особенности влияние Гельмгольца пробудили в нём интерес к физике. С этого момента (1870) Этвеш окончательно посвящает себя физике.

В период 1873—1887 гг. Этвеш занимается исследованием капиллярных явлений. Он впервые ввёл понятие о молекулярной поверхностной энергии и установил закон зависимости её от температуры. Закон Этвеша (1886) может быть выражен формулой:

$$\alpha (Mv)^{\frac{2}{3}} = k (\tau - d).$$

Здесь α — коэффициент поверхностного натяжения, M — молекулярный вес, v — удельный объём жидкости, τ — разность между данной и критической температурой, d и k — постоянные. С 1878 г. Этвеш возглавляет кафедру экспериментальной физики в Будапештском университете. С 1881 г. он ведёт свои классические исследования по гравитации. Им был сконструирован точнейший прибор для измерения вариации силы тяжести и определения поверхностей уровня, нормальных к силе тяжести. Приборы Этвеша были основаны на принципе одонитных крутильных весов с большим периодом колебания (до 20 минут). Наблюдая качания горизонтального стерженька в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, можно было определить значения главных радиусов кривизны поверхности уровня. Эти исследования Этвеша были доложены им на Международном конгрессе

физиков. В другом приборе к коромыслу крутильных весов подвешивались на разных высотах грузы. Этвеш доказал с помощью своих приборов с громадной точностью равенство инертной и гравитационной масс. Методы Этвеша легли в основу гравиметрии и геофизической разведки полезных ископаемых.

Умер Этвеш в 1919 г. в Советской Венгрии. Его заслуги были отмечены венгерским Советом Народных Комиссаров. В 1950 г. имя Этвеша было присвоено Будапештскому университету.

Исследования Этвеша по доказательству равенства гравитационной и инертной масс продолжали исследования, начало которым было положено опытами Ньютона с маятниками.

Эти опыты повторены Бесселем, установившим равенство инертной и гравитационной масс с точностью до 0,000618. В основе эксперимента Этвеша лежит факт отклонения отвеса от вертикали вследствие действия центробежной силы вращения Земли, которая на широте φ равна $m_u r \cos^2 \omega^2$. Здесь m_u обозначает инертную массу, r — радиус Земли, ω — угловую скорость вращения Земли. Сила тяжести равна $m_2 g_0$, где m_2 — гравитационная масса, и направлена к центру Земли по радиусу. Равнодействующая обеих сил наклонена к радиусу под углом α :

$$\sin \alpha = \frac{m_u r \omega^2}{2m_2 g} \sin 2\varphi,$$

где g — кажущееся ускорение тяжести. Приближённо

$$\alpha = \frac{m_u}{m_2} 0,0017 \sin 2\varphi.$$

Положим $\frac{m_u}{m_2} = k$, которое вообще различно для разных тел. Тогда и α будет различно для разных тел. Разность углов отклонения для двух тел:

$$\epsilon = \alpha_1 - \alpha_2 = (k_1 - k_2) 0,0017 \cdot \sin 2\varphi.$$

Этвеш подвешивал на лёгком коромысле две массы одинакового веса из различного вещества. Коромысло располагалось перпендикулярно меридиану. Если существует неравенство отклонений, то возникает крутящий момент:

$$M = mg (\alpha_1 - \alpha_2) l = mg \epsilon l.$$

Проволочка закрутится на угол $\gamma = \delta M$. При повороте коромысла на 180° момент изменит знак и разность углов $2\gamma = 2\delta M$. Этвеш установил равенство масс с точностью до 10^{-8} .

Дадим сводку определений гравитационной постоянной G и средней плотности Земли Δ к 1901 г.

Метод	Автор	Δ	G
Крутильные весы	Бойс (1889)	5,527	$6,658 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3 \text{ сек}^{-2} \text{ г}^{-1}$
	Браун (1897)	5,5270	$6,596 \cdot 10^{-8} \text{ » » »}$
Двойной маятник	Вилсинг (1887)	5,577	$6,698 \cdot 10^{-8} \text{ » » »}$
	Пойнтинг (1893)	5,4934	$6,698 \cdot 10^{-8} \text{ » » »}$
Весы	Рихард и Кригер — Менцель (1898)	5,050	$6,685 \cdot 10^{-8} \text{ » » »}$

Последний метод был применён впервые Жоли в 1878 г. и заключался в том, что под один из уравновешенных грузов весов помещается большая масса M . Разность весов дает меру для силы приложения между M и m .

Гипотезы о природе тяготения. Не прекращались попытки раскрыть природу тяготения, свести силу всемирного тяготения к близкодействующему процессу в среде. Эту задачу поставил перед собой М. В. Ломоносов, считавший дальноедействующее тяготение несовместимым с законом сохранения материи и движения. Его современник и единомышленник во многих вопросах Л. Эйлер пытался объяснить закон тяготения разностью плотностей эфира, окружающего гравитационные массы. Эта гипотеза связана с представлением об эфире как жидкой среде, в которой благодаря разности давлений могут возникать эфирные токи. С помощью этих эфирных токов И. Яковский в 1888 г. пытался дать кинетическое истолкование всемирного тяготения. К аналогичным представлениям пришел Г. Гельм в 1881 г. и К. Пирсон в 1898 г.

Другая идея, положенная в основу механического объяснения гравитации, была идея эфирных колебаний. Можно было, например, представить, что гравитирующие тела или атомы находятся в состоянии колебательного движения, эти колебания распространяются через эфир до притягиваемого тела и обуславливают его притяжение. В 1859 г. Челлис исследовал аналитически вопрос: как должны действовать продольные волны в жидкости, изменения плотности которой пропорциональны изменению давления, на неупругие гладкие шарики, погруженные в упругую жидкость? Он пришел к результату, что шарики гонятся к центру сферической волны, если длина волны велика по сравнению с радиусом шарика. Таким образом для объяснения гравитации продольными колебаниями следует допустить, что длина волны в эфире очень велика по сравнению с размерами гравитирующих атомов. В проблеме Челлиса имеется существенный пробел, он считает притягивающее тело колеблющимся, притягиваемое неподвижным. Для объяснения взаимного тяготения различие между притягивающимся и притягивающим телом недопустимо. Правильнее будет постановка задачи о взаимодействии пульсирующих тел.

Такая задача была поставлена впервые К. А. Бьеркнесом, в 1878 г. и изложена в расширенном виде его сыном В. Бьеркнесом в сочинении «Лекции о гидродинамических дальноедействующих силах по теории К. А. Бьеркнеса», вышедшем в 1900 г.

Бьеркнес доказал, что два пульсирующих шара, радиусы которых малы по сравнению с их взаимным расстоянием, помещенные в несжимаемую жидкость, будут притягиваться с силой, прямо пропорциональной произведению амплитуд пульсаций и обратно пропорциональной квадрату расстояния между их центрами, в случае, если частоты пульсаций и фазы совпадают. Если же фазы противоположны, то притяжение сменяется отталкиванием. Математически результат Бьеркнеса выражается следующим образом. Пусть радиусы шаров A_1 и A_2 пульсируют по закону:

$$a_1 = A_1 + c_1 \cos (nt + \varepsilon_1);$$

$$a_2 = A_2 + c_2 \cos (nt + \varepsilon_2).$$

Тогда средняя сила взаимодействия между шарами, центры которых удалены на расстояние $l \gg a_1$ и a_2 , выражается формулой:

$$K_x = -\frac{2\pi\rho}{l^2} c_1 c_2 n^2 \cos (\varepsilon_1 - \varepsilon_2),$$

где ρ — плотность жидкости. Отсюда $K_x < 0$ (притяжение), если $\varepsilon_1 - \varepsilon_2 < \frac{\pi}{2}$.

При $\epsilon_1 - \epsilon_2 = \frac{\pi}{2}$, $K_x = 0$; при $\epsilon_1 - \epsilon_2 > \frac{\pi}{2}$ $K_x > 0$ (отталкивание). Сле-

довательно, для того чтобы свести гравитацию к пульсациям атомов и молекул, необходимо выполнение следующих условий:

а) пульсации всех атомов и молекул должны совпадать по частоте и фазе,

б) интенсивность пульсаций должна быть пропорциональна массам.

Бьеркнес демонстрировал свою теорию в 1881 г. на Парижской электрической выставке при помощи двух пульсирующих барабанов, находящихся под водой.

Легги (A. N. Leahy) (1885) указал, что в сжимаемой жидкости действие двух шаров, колеблющихся с одинаковой частотой и фазой, меняет знак, если расстояние между ними превосходит половину длины волны.

Поэтому для объяснения гравитации по Бьеркнесу надо предполагать эфир полностью несжимаемым, или по крайней мере столь мало сжимаемым, что половина длины волны эфирных колебаний больше таких расстояний, для которых подтверждена справедливость закона Ньютона.

Корн (A. Corn) в работе «Теория гравитации и электрических явлений на основе гидродинамики» (1898), сделал это последнее предположение и распространил теорию на электромагнитные явления.

Интересное развитие исследования Бьеркнеса получили в работе П. Н. Лебедева «Экспериментальное исследование пондеромоторного действия волн на резонаторы» (1894, 1896, 1897). Согласно основной идее П. Н. Лебедева молекулы, излучающие электромагнитные волны, взаимодействуют между собой: «между молекулами в этом случае существуют молекулярные силы, причина которых неразрывно связана с процессами лучеиспускания»¹. Исследовав этот вопрос на электромагнитных моделях молекул, которые он представил в виде электромагнитных осцилляторов, Лебедев «перешёл к исследованию гидродинамических колебаний, распространяя известные работы Bjerknæs'a, изучившего пондеромоторные силы при независимых движениях, на явления колеблемого резонатора».

«В своих работах Bjerknæs, отыскивая аналогию между статическими явлениями электричества и магнетизма, с одной стороны, и гидродинамическими колебаниями с другой, находит её не прямою, а обратную; вот почему особый интерес представляет собой найденный мною факт, что при сравнении электрических колебаний с колебаниями гидродинамическими эта аналогия оказывается полною и прямою»².

При изучении взаимодействия акустических резонаторов Лебедев встретился с интересной особенностью: «В то время, как в непосредственной близости от источника закон пондеромоторного действия акустической волны на её резонатор тождественен с соответствующим законом для электромагнитных, а также для гидродинамических колебаний, при постепенном увеличении расстояния это тождество постепенно ступенькается, и его место занимает новый закон, совершенно отличный от предыдущего: при увеличении расстояния от источника притяжение, понемногу сглаживаясь, наконец совершенно исчезает и его место заступает отталкивание (наибольшая величина которого при полном резонансе)»³.

¹ П. Н. Лебедев, Собр. соч., стр. 57.

² Там же, стр. 60.

³ Там же, стр. 61.

Лебедев показал теоретически, что указанный эффект должен иметь место и для электромагнитных, как и для гидродинамических резонаторов на больших расстояниях. В качестве конечного вывода Лебедев формулирует полную аналогию («тождественность») в действии пондеромоторных сил между электромагнитными, гидродинамическими, акустическими и другими возможными резонаторами, которая показывает, «что те элементарные законы, к которым сводятся наблюдаемые явления, должны быть независимы от физической природы данных колебаний и воспринимающих их резонаторов»¹.

Возвращаясь к вопросу о тяготении, следует отметить, что гипотеза Бьеркнеса основана на предположениях, которые сами нуждаются в объяснении: каким образом возникают синхронные и синфазные колебания атомов?

Вебер (J. H. Weber) показал в 1898 г., что пульсирующие шары обладают свойством «саморегулировки». силы, возбуждаемые колебаниями шаров в жидкости, быстро приводят эти шары к синхронизму, даже если вначале этого синхронизма не было. Вебер заключает, что атомы пульсируют вообще и эти пульсации сами собой приводятся к синхронизму. Однако вопрос о причинах самих пульсаций оставался открытым.

Другая точка зрения заключалась в том, что атомы не сами возбуждают колебания, а экранируют или поглощают колебания эфира.

Эстонец Н. Деллингсгаузен в работе «Тяжесть или действующее начало потенциальной энергии» (1884) исходит из представления о материи, как однородной, неизменной и невесомой сущности, все различия в которой обусловлены движениями. Эта же сущность составляет основу эфира. Эфир заполнен волновым движением. Тела—это области, в которых интерферирующие волны образуют устойчивые образования стоячих волн. Энергия этих замкнутых, не выявляющихся во вне интерферирующих движений и есть потенциальная энергия. Эфир представляет собой среду, заполненную такими стоячими волнами. Космические тела, находящиеся в этом эфире, поглощая энергию волн, мешают образованию устойчивого колебательного состояния эфира, в котором возникают бегущие волны, приводящие к взаимному тяготению тел, вследствие разрушения их внутренней системы стоячих волн, что означает переход потенциальной энергии в кинетическую.

Таким образом система Деллингсгаузена является своеобразным вариантом волновой теории материи. Вместе с тем теория Деллингсгаузена, примыкая к энергетике, ставит своей целью всё свести к явлениям движения, идеалистически извращая взаимосвязь движения и материи, сводя последнюю к чистому движению. Как и Оствальд, Деллингсгаузен пророчествует о крушении атомистики: «Отныне можно с уверенностью предсказать крушение атомистики... Будущие исследователи природы... оставят атомистику и обратятся к тому учению без искусственных вспомогательных средств, без атомов, без сил и невесомых, которое могло дать то, над чем в течение 3000 лет тщетно работала атомистическая теория...»².

Деллингсгаузен спекулирует на трудностях проблемы тяготения. Смелая попытка Лесажа объяснить гравитацию ударами микроскопических частиц, движущихся во всех направлениях в мировом пространстве, оказалась несостоятельной. Максвелл вычислил, что энергия, сообщаемая быстрыми эфирными частицами телу, о которое они ударяются, в течение нескольких секунд довела бы тело до каления.

¹ П. Н. Лебедев, Собр. соч., стр. 120.

² Ф. Розенбергер, История физики, ч. III, стр. 237.

Изенкраге (1879) сделал попытку развить теорию Лесажа. Он приписал гравитационному эфиру свойство газа, атомы которого обладают различными скоростями. Тела пронизаемы для этих эфирных атомов в силу того, что между молекулами тел имеются значительные расстояния. Для объяснения пропорциональности силы ударов эфирных частиц массе взаимодействующих тел, он предполагает однородность «последних составных частей материи», которые, может быть, являются сами эфирными атомами.

Ризанек (A. Rysánek) в 1887 г. еще более уточнил картину ударов эфирных частиц, применив методы кинетической теории газов, в частности принял, что скорость эфирных атомов распределена по закону Максвелла, тогда как Изенкраге хотя и допускает различие в скоростях частиц, однако оперирует с одной средней скоростью.

В теориях Изенкраге и Ризанека имеется существенная трудность. Для наступления гравитационного действия необходимо, чтобы эфирные атомы при ударе теряли скорость поступательного движения, что достигается проще всего гипотезой неупругого удара. Возникает вопрос о том, куда девается потерянная энергия. Изенкраге допускал возможности потерь этой энергии, которые являются неощутимыми по сравнению с необъятным запасом всей энергии. Но тем самым он по сути дела отказывается от закона сохранения энергии. Не удалось разрешить без противоречий это затруднение и Ризанеку. Существует и ряд других трудностей: влияние промежуточного тела, сопротивление движению планет, оказываемое эфирными ударами, и т. д. Попытки кинетического истолкования тяготения также не увенчались успехом, как и теории континуума. Тяготение не поддавалось механическому объяснению.

Тогда возникли попытки свести тяготение к немеханическим причинам, а именно к электромагнитным взаимодействиям. Факты гравитации могут быть выражены на языке теории поля. Описывая гравитационное поле с помощью вектора напряженности $\vec{F}$ (силы, действующей на единицу массы), получаем уравнения поля в виде

$$\operatorname{rot} \vec{F} = 0, \quad \operatorname{div} \vec{F} = -4\pi G\rho,$$

где G — постоянная тяготения, ρ — объёмная плотность гравитационной материи.

Однако в этом «полевом» описании тяготения имеется существенная трудность, указанная Максвеллом. Если считать энергию тяготения локализованной в поле, то для того чтобы из нее можно было всегда получить притяжение, выражение энергии элемента объема dv следует писать в виде:

$$\left(C - \frac{1}{8\pi G} F^2\right) dv.$$

При этом константа C должна быть выбрана больше $\frac{1}{8\pi G} F_m^2$, где F_m — максимальное значение напряженности поля тяготения, в какой-либо точке вселенной, чтобы значение энергии оставалось положительным. Но в таком случае в точках, где $F = 0$, например в точке между Солнцем и Землёй, где силы тяготения взаимно уравновешиваются, плотность энергии должна быть аномально велика. Максвелл указывает, что невозможно представить среду с такими свойствами.

Другое затруднение полевого описания заключается в том, что не доказано наличия конечной скорости распространения тяготения. Поэтому

полевое описание является «квазиполевым», за которым скрывается мгновенное дальное действие.

Электрическую теорию тяготения впервые стал развивать М о с с о т т и в 1836 г. Следуя Эпинусу он предположил, что между частицами тела, так же как и между эфирными частицами, действуют отталкивательные силы. Но между частицами тела и эфира действуют притягательные силы, превосходящие отталкивание. Отсюда получается ньютоновское притяжение вещественных частичек, погруженных в эфир.

Ц е л л ь н е р в 1882 г. конкретизировал эту идею, считая гравитирующие атомы состоящими из положительно и отрицательно заряженных частиц, причем силы отталкивания одноименных зарядов перевешиваются притяжением разноименных зарядов. В. В е б е р математически обработал теорию Целльнера на основе своего электродинамического закона.

В 1900 г. Г. А. Л о р е н т ц, исходя из факта, что в электростатических взаимодействиях влияние скорости перемещения частиц сказывается только во втором порядке отношения $\beta = \frac{v}{c}$, попытался обработать проблему гравитации методом, аналогичным проблеме электрических взаимодействий, допуская, что тяготение передается через эфир аналогично электрическим силам. При таком предположении не требуется для сил тяготения большей скорости распространения, чем скорость света, чтобы прийти в согласие с наблюдениями, до сих пор не обнаружившими влияния движения на тяготение.

Подводя итоги, следует сказать, что проблема тяготения не была решена в XIX веке и перешла в XX век. Первый существенный успех в решении этой труднейшей проблемы физики был достигнут Альбертом Э й н - ш т е й н о м (1879—1955).

Молекулярная
физика
и гидродинамика.

Вторая секция конгресса обсуждала следующие доклады: Ф о г т «Упругость и симметрия кристаллов», М е с н а ж е р «Деформация твердых тел», Г и л ь о м «Остаточная деформация металлов», Роберт А у с т е н «Микрография сплавов», С п р и н г «Твердые тела под давлением», В е й н б е р г «Плавление и кристаллизация по исследованиям Таммана», В а н т - Г о ф ф «Кристаллизация при постоянной температуре», Ш в е д о в «Твердость жидкостей», Б а т т е л и «Калориметрия жидкостей», В а н - д е р - М е н с е р а д ж «Капиллярность», А м а г а «Статика жидкостей», В а н - д е р - В а а л ь с «Статика жидких смесей», М а т и а с «Критическое состояние», Б. Г о л и ц ы н «Критический показатель преломления», Б р и л л у м «Диффузия газов», П е р р е н «Осмос», Б ь е р к н е с «Гидродинамические действия на расстоянии».

Нельзя не обратить внимание на большое количество докладов, посвященных физике твердого тела и в частности физике металлов. Эта важнейшая глава современной физики возникла в конце XIX в., в непосредственной связи с запросами металлургии. Одним из основателей науки о металле был русский учёный металлург Д. К. Ч е р н о в, о котором уже шла речь в первой главе. В 1868 г. он сделал доклад в Русском техническом обществе под названием «Критический обзор статей г. г. Лаврова и Калакуцкого о стали и стальных орудиях и собственные исследования Д. К. Чернова по этому вопросу». Этим докладом Чернов положил начало новой науки — металлографии. Если нагревать сталь, то с изменением температуры изменяются и её свойства. Чернов показал, что при повышении температуры стали до некоторой температуры, соответствующей

щей темновышневому калению (эту температуру Чернов назвал точкой *a*), происходит изменение структуры стали. При дальнейшем нагревании стали до «красного неблестящего каления» происходит дальнейшее изменение её структуры (эту температуру Чернов назвал точкой *b*), при температуре *c* сталь плавится. При этом Чернов пришёл к важному заключению: «точки *a*, *b* и *c* не имеют постоянного места на шкале и перемещаются сообразно со свойствами стали; для чистой стали это перемещение прямо зависит от процентного содержания в ней углерода»¹. От процентного содержания углерода зависит положение и другой точки *X*, расположенной между *b* и *c* ($b < X < c$). При этой температуре сталь, начиная плавиться, распадается на зёрна. Точка *a* характеризуется тем, что до тех пор, пока сталь не нагрета до этой точки, она не принимает закалки, как бы быстро её ни охлаждали. О точке *b* Чернов писал:



Д. К. Чернов

«Как только температура стали возвысилась до *b*, масса стали быстро переходит из зернистого или, вообще говоря, кристаллического, в аморфное (воскообразное) состояние, которое удерживается при дальнейшем нагревании до самой точки плавления, т. е. точки *c*»². При этом, как указывал Чернов, выше точки *b* сталь «имеет аналогию с чрезвычайно концентрированным раствором кристаллизующейся соли». Так впервые была высказана идея твёрдого раствора. Вместе с тем в работах Чернова содержались основы учения о диаграммах состояния сплавов, развившегося впоследствии в мощный метод физико-химического анализа.

Через 10 лет после этого доклада Чернов выступил с докладом «Исследования, относящиеся до структуры чистых стальных болванок». Важную техническую проблему о борьбе с газовыми включениями в сталелитейном процессе Чернов решал путём применения примесей (кремния, марганца), препятствующих возникновению окиси углерода — главной причине газовых включений. Изучая процесс застывания стали, Чернов впервые показал существенное значение в этом процессе кристаллизации, ввёл понятие центров кристаллизации, изучил самый процесс кристаллизации в застывающей стали, дендритную, ветвистую форму её кристаллов. В усадочных раковинах, образующихся в процессе застывания стали в изложницах, по наблюдениям Чернова стенки «усеяны древовидными ростками, дендритами самых разнообразных очертаний». Самый процесс кристаллизации Чернов описывает следующим образом:

«Наблюдая под микроскопом с большим увеличением образование кристаллов солей при выделении их из растворов, замечаем, что рост кристаллов от какой-нибудь точки выражается сначала быстрым появлением осей, ветвей или даже плоскостей, почти одновременно по различным однород-

¹ Труды по истории техники, АН СССР, т. II, 1953, стр. 65—66.

² Там же, стр. 68.

ным направлениям, согласным с направлением кристаллографических осей образующихся кристаллов. От главных осей идут ветви первого порядка, от них отбрасываются ветви второго порядка и т. д.; это совершается такими быстрыми скачками, что уловить образование отдельных ветвей нет никакой возможности. Все эти быстро отброшенные ветви постепенно утолщаются и удлиняются, следствием чего является встреча и срастание ветвей друг с другом...»

«Только что сказанное о кристаллизации солей вообще применимо и к стали в момент её затвердевания. Влитая в металлическую форму (изложницу), расплавленная сталь остывает и отвердевает сперва около стенок формы в виде коры; если спустя некоторое время удалить (вылить) ещё не затвердевшую сталь из формы, то по внутренней поверхности коры легко видеть — каким путём происходит переход стали из жидкого состояния в твёрдое. Оказывается, что сталь в этом случае ведёт себя как вещество кристаллизующееся, бросающее оси и ветви прерывчатых кристаллов, которые при рассмотрении под микроскопом представляются в виде скоплений правильных октаэдров»¹.

Процесс кристаллизации после Чернова стал предметом исследования ряда физиков. Дендритная форма кристаллов, изученная Черновым, получается при быстром охлаждении. В условиях медленного и осторожного охлаждения, не допуская переохлаждения и конвекционных потоков² маточного раствора, можно выращивать правильные монокристаллы, форма которых будет определяться не внешними физическими обстоятельствами, а внутренней химической природой кристаллизующегося вещества.

Гиббс в 1878 г. показал, что эта форма соответствует минимуму поверхностной энергии кристалла. Аналогичные соображения были высказаны П. Кюри в 1885 г. и Ю. В. Вульф в 1895 г.

Пьер Кюри начал заниматься вопросами физики кристаллов с 1880 г. Вместе с своим братом Жаком Кюри он открыл пьезо-электрический эффект, а в 1882 г. открыл свойства пьезо-кварца, теоретически предсказанные Липпманом. Кюри использовал эти свойства для измерения малых электрических зарядов, сконструировав специальный электрометр. В дальнейшем свойства пьезо-кварца были применены учеником Кюри Полем Ланжевенном для локации подводных лодок с помощью ультразвуков. В связи с разработкой проблем кристаллофизики Пьер Кюри пришёл к установлению глубокого принципа симметрии. Он сформулировал его в следующих выражениях:

«Когда определённые причины порождают известные следствия, элементы симметрии причин должны вновь появиться в порождённых следствиях».

«Когда известные следствия имеют в себе известную дисимметрию, эта последняя должна находиться и в порождающих явление причинах».

«Положения, обратные двум предыдущим, неправильны по крайней мере на практике, т. е. следствия могут быть симметричнее вызвавших их причин»³.

¹ Труды по истории техники, стр. 26—27.

² При кристаллизации будут наблюдаться так называемые концентрационные потоки, обусловленные самим процессом образования кристалла из раствора; речь идёт в тексте не о них, а о потоках, вызванных посторонними влияниями. Влияние концентрационных потоков Вульф уничтожал вращением кристаллизатора.

³ М. Кюри, Пьер Кюри, М., 1924, стр. 22.

Этот принцип Кюри Ланжевен рассматривал как один из общих принципов естествознания, равнозначный по своей общности первому и второму началам термодинамики.

Применение принципа минимальной энергии к процессу кристаллизации мы находим в работе Кюри «Об образовании кристаллов и о капиллярных постоянных их различных граней», опубликованной в 1885 г. В этой работе Кюри формулирует следующие положения:

«Если тело изъято от всяких сил, кроме капиллярных, то, так как система стремится иметь минимум энергии, поверхность раздела будет стремиться стать наименьшей и тело принимает сферическую форму.

Если несколько поверхностей раздела $s_1, s_2, s_3 \dots$ с капиллярными постоянными $k_1, k_2, k_3 \dots$ ограничивают тело, то устойчивой формой будет та, при которой количество $s_1 k_1 + s_2 k_2 + s_3 k_3 + \dots$ станет наименьшим».

Отсюда вытекает важное следствие: «Объем вещества, отлагающегося при кристаллизации на какой-нибудь грани, пропорционален поверхностной энергии этой грани, и вообще поверхностная энергия кристалла пропорциональна работе, затраченной на образование всего кристалла».

«Рассмотрим теперь кристалл в его насыщенном маточном растворе и предположим, что некоторые части растворяются и потом отлагаются на другие части; кристалл будет деформироваться, тогда как ни он, ни его маточный раствор не испытают изменения ни в природе, ни в объеме. Если оставить без внимания весьма малую работу силы тяжести, изменяться будет только энергия у поверхности разграничения кристалла и его маточного раствора и наиболее устойчивой будет та, для которой сумма энергий у поверхности будет наименьшая.

Каждой грани кристалла должна отвечать своя капиллярная постоянная, потому что в противном случае кристалл стремился бы в маточном растворе принять сферическую форму.



Рис. 143. Кристалл Чернова

Преобладающая форма должна состоять из граней, на которых капиллярная постоянная имеет наименьшую величину»¹.

Развивая эти теоретические положения Кюри, Вульф доказывает, что «минимум поверхностной энергии при данном объёме многогранника достигается при том взаимном расположении его граней, когда они удалены от одной и той же точки на расстоянии, пропорциональное их капиллярным постоянным»².

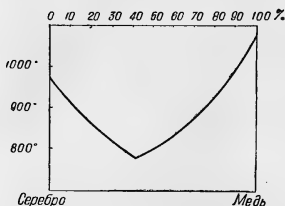


Рис. 144. Точка эвтектики

Из этого предложения выводится важное следствие: «Скорости роста граней кристалла пропорциональна капиллярным постоянным граней относительно маточного раствора». Таким образом, «измеряя относительную скорость роста граней, мы тем самым измеряем относительную величину капиллярных постоянных этих граней относительно маточного раствора, в котором растёт кристалл»³.

Таким образом, принцип минимума поверхностей энергии был последовательно разработан Гиббсом, Кюри и Вульфом, почему и носит название принципа Гиббса-Кюри-Вульфа.

Рассмотрим теперь кристаллизацию смесей. Если взять чистый металл в расплавленном состоянии и начать его охлаждать, то, достигнув определённой температуры, металл застывает, причём температура не меняется

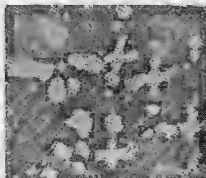
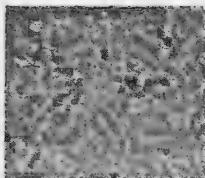


Рис. 145. Микрофотографии эвтектического сплава золота и алюминия

(точка плавления). Однако при прибавлении к нему другого металла точка плавления понижается. Так, если к серебру, точка плавления которого 960° С, прибавить медь, то точка плавления полученного сплава будет понижаться примерно пропорционально концентрации. Если к чистой меди (температура плавления 1081° С) прибавлять серебра, то температура её

¹ Ю. В. Вульф, Избранные работы по кристаллофизике и кристаллографии, АН СССР, 1952, стр. 94—95.

² Там же, стр. 103.

³ Там же, стр. 104.

плавления будет также понижаться, и тем больше, чем больше концентрация серебра в меди.

Если построить кривые зависимости точки плавления сплава $\text{Ag} + \text{Cu}$ от концентрации меди, то обе кривые пересекутся в одной точке, называемой точкой эвтектики, которой соответствует определённый состав сплава—эвтектический состав (рис. 144). Эвтектический состав сплава имеет определённую точку плавления, подобно чистому металлу. Если охлаждать сплав серебра и меди с концентрацией меди меньше эвтектического состава, то после достижения температуры плавления серебра начинают выделяться кристаллы Ag , благодаря чему в расплавленной

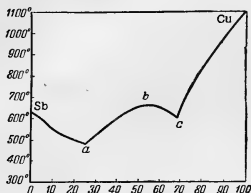


Рис. 146

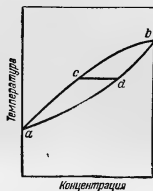


Рис. 147

массе будет повышаться концентрация меди. Когда концентрация меди в расплавленной массе по мере охлаждения сплава достигнет эвтектического состава, то начинается затвердевание и серебра и меди, образуются кристаллы того и другого металла в том же самом соотношении, в каком они имелись в жидкости. На рисунках 145 приведены микрофотографии эвтектического сплава золота и алюминия (слева) и состава с избытком одного из этих металлов, крупные кристаллы которого отчётливо видны на фоне эвтектики. Эти микрофотографии были получены Гейкоком и Невиллом в 1900 г. Если металлы могут вступать в химическое соединение, то соотношения усложняются.

Диаграмма точки плавления для таких сплавов (например, для исследованного ле Шателье сплава сурьмы и меди, в котором медь и сурьма могут образовывать соединение SbCu_2) имеет два минимума, соответствующие двум эвтектическим точкам a и c , одна из которых соответствует конгломерату кристаллов сложного тела с кристаллом меди, другая конгломерату кристаллов сложного тела и сурьмы (см. рис. 146). Между ними существует максимум, отвечающий точке плавления сложного тела (в нашем примере SbCu_2).

Такой ход кривой плавления обнаружил Роберт Аустен для сплава золота и алюминия, максимум соответствовал формуле Al_2Au . Однако могут быть случаи, когда состав твёрдого соединения может меняться непрерывно, в таком случае говорят о твёрдых растворах. Именно к такому случаю относится соединение железа с углеродом, исследованное Черновым.

Для теории твёрдых растворов важное значение имела теория фазовых равновесий, разработанная Гиббсом в 1875—1878 гг. Эти результаты долго оставались неизвестными европейским учёным, и только Максвелл обратил на них внимание и дал им высокую оценку. Но в конце XIX в. ряд физиков.

и химиков обратили внимание на исследования Гиббса и использовали их в частности для теории растворов.

К исследованию твёрдых растворов термодинамические принципы Гиббса были применены голландским физиком Р у з б у м о м (1899).

В простом случае зависимость температуры равновесия жидкой и твёрдой фазы раствора от концентрации (кривая T_x) имеет вид, указанный на рисунке 147. Здесь верхняя кривая — «ликвидус» — представляет границу жидкого состояния. Все точки диаграммы выше этой кривой соответствуют

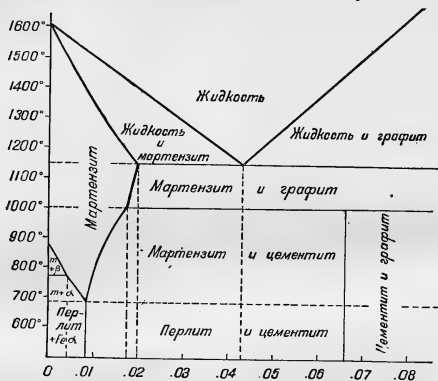


Рис. 148. Диаграмма Рузбума для сплава железа и углерода

жидкой фазе: нижняя кривая — «солидус» — представляет границу твёрдой фазы. Все точки диаграммы ниже этой кривой соответствуют твёрдому состоянию.

При определённой температуре жидкость, находящаяся в состоянии c , находится в равновесии с твёрдым телом другого состава d . По мере застывания соотношения жидкого и твёрдого сплава меняются. Для других растворов, в частности $\text{Fe} + \text{C}$, $\text{Cu} + \text{Sn}$ (бронза), соотношения ещё более сложны, существует целый ряд фазовых областей. На рисунке 148 дана диаграмма T_x для железа, построенная Р у з б у м о м.

Т а м м а н, об исследованиях которого докладывал русский физик Б. П. Вейнберг и который в то время работал в Дерптском университете, ввёл идею, что только кристаллические тела можно считать твёрдыми, а аморфные твёрдые тела — переохлаждёнными жидкостями. Он, а также Гейкок и Невилл показали, что закон Рауля, определяющий положение точки замерзания растворов, применим, хотя и в изменённой степени, к сплавам.

Развивая идеи, впервые высказанные Черновым о температурных точках, при которых происходят структурные изменения вещества, Тамман нашёл такие превращения для ряда веществ. Так, сера при давлении в 1 ат

превращается из ромбической в моноклинную; точка превращения по Тамману $94^{\circ},6$. Полиморфные формы были найдены им у ряда веществ: азотно-аммиачной соли, йодистого серебра, фенола и т. д. В частности он нашёл, что, кроме обычного льда (лёд I), существует лёд II и лёд III. Лёд III плотнее воды и образуется, когда лёд I, находящийся при температуре -22°C , подвергается давлению до 2200 кг/см^2 ; при повышении давления до 3605 кг/см^2 температура плавления его повышается до $-17^{\circ},3$. Лёд II получается, если лёд I при -80°C подвергать давлению около $2600\text{—}2900\text{ кг/см}^2$. При $t = -22^{\circ},4\text{ C}$ и $p = 2230\text{ кг/см}^2$ лёд I и лёд II находятся в равновесии.

Таковы в общих чертах результаты и направления исследования в области физики металлов. Они находятся в теснейшей связи с общими проблемами термодинамического равновесия и учения о растворах, которые в тот же период получили существенное развитие в трудах Гиббса, Гельмгольца, Вант-Гоффа и других. Об этих проблемах говорилось в ряде докладов (Вант-Гоффа, Ван-дер-Ваальса, Перрена), и мы остановимся здесь кратко на принципиальной стороне дела.

Изучаются ли фазовые превращения, или химические реакции, всегда встаёт вопрос о направлении этих превращений, их скоростях и условиях равновесия. Для фазовых превращений и более общих термодинамических процессов эти условия были найдены Гиббсом в 1876 г. Система из произвольного числа фаз и компонент, находящаяся при определённых температуре и давлении, будет находиться в устойчивом термодинамическом равновесии при минимуме термодинамического потенциала системы.

В вышедших в 1884 г. «Этюдах химической динамики» Вант-Гоффа этот принцип Гиббса в совершенно независимой от него форме формулируется Вант-Гоффом в качестве самостоятельного принципа подвижного химического равновесия: всякое равновесие между двумя различными состояниями при понижении температуры передвигается в сторону той из двух систем, образование которой сопровождается выделением тепла. Например, при температуре плавления, соответствующей заданному внешнему давлению, жидкая и твёрдая фазы находятся в равновесии (соответствующем условию Гиббса). Понижение температуры нарушит это равновесие, часть жидкости будет переходить в твёрдое состояние, причём будет выделяться скрытая теплота плавления.

Принцип Вант-Гоффа представляет собой частный случай высказанного в 1883 г. принципа ле Шателье: если система находится в состоянии физического или химического равновесия, то при действии на неё сил, вызывающих изменение равновесия, в системе возникает реакция, препятствующая производимому изменению.

В том же 1884 г., когда вышел классический труд Вант-Гоффа, французский физик Р а у л ь установил следующие законы: 1) для всякого



Э. Вант-Гофф

растворённого вещества его влияние пропорционально концентрации; 2) при равной молекулярной концентрации два какие угодно вещества (в одном и том же растворителе) оказывают одно и то же влияние. Это влияние может быть выражено в понижении упругости насыщенного пара над раствором, в понижении точки замерзания, в повышении температуры кипения. Так, например, если в N грамм-молекулах растворителя, упругость насыщенных паров которого равна p_0 , растворено n грамм-молекул вещества, то упругость паров раствора понизится до значения p , причём

$$\frac{p - p_0}{p_0} = \frac{n}{N}$$

независимо от природы растворённого вещества. Понижение точки замерзания для водных растворов выражается формулой

$$\Delta T = 18,4 \frac{n}{N}.$$

Для другого растворителя этот закон выражается формулой

$$\Delta T = k \frac{n}{N},$$

где постоянная k называется криоскопической постоянной. Для воды $k = 18,4$.

Законы Рауля применимы только к слабым растворам. Для сильных растворов они обнаруживают отступления. Точно такие отступления наблюдаются и для электролитических растворов.

Почему же для слабозведённых растворов природа растворённого вещества не проявляется, а влияние оказывает только концентрация? Вопрос этот был выяснен в 1886 г. в мемуаре Вант-Гоффа «Законы химического равновесия в состоянии рассеянном, газообразном или растворённом».

Одновременно с Вант-Гоффом проблемой растворов занимались Д. И. Менделеев, М. Планк, С. Аррениус, В. Ф. Алексеев, Д. П. Коновалов и многие другие физики и химики того времени.

Интерес к теории растворов вполне понятен: здесь пограничная область физики и химии, и именно в этот период боролись физическая и химическая теории растворения; здесь надеялись прощупать «таинственные» межмолекулярные силы. Именно об этой стороне дела писал Д. И. Менделеев, сам склонявшийся на сторону химической теории растворения: «Две указанные стороны растворения (т. е. физическая и химическая) и гипотезы, до сих пор приложенные к рассмотрению растворов, хотя имеют отчасти различные сходные точки, но без всякого сомнения со временем, по всей вероятности, приведут к общей теории растворов, потому что одни общие законы управляют как физическими, так и химическими явлениями, ибо лишь от свойств и движений атомов, определяющих химические взаимодействия, зависят свойства и движения частиц, составленных из атомов и определяющих физические соотношения»¹.

Из подчёркнутых нами слов можно видеть, что Менделеев полагал будущий синтез в теории растворов в выяснении «свойств и движений атомов». Вместе с тем нельзя не усмотреть удивительного параллелизма во

¹ Д. И. Менделеев, Основы химии, т. I. Госхимиздат, 1947, стр. 385.

взглядах Менделеева и Энгельса по вопросу об «иерархии» физики и химии. Менделеев считал, что в основе химии лежит «механика атомов» (свойства и движения атомов определяют химические взаимодействия), в основе же физики «механика молекул» (движения частиц, составленных из атомов, определяют физические соотношения). Сравним у Энгельса: «... в историческом развитии естествознания раньше всего разрабатывается теория простого перемещения, механика небесных тел и земных масс; за ней следует теория молекулярного движения, физика, а тотчас же вслед за последней, почти наряду с ней, а иногда раньше неё, наука о движении атомов, химия»¹.

Физики и химики конца XIX столетия дружно изучали проблему молекулярных движений на явлениях растворения, адсорбции, диффузии, осмоса и т. д. В 1877 г. явления осмоса были подвергнуты изучению ботаником Пфеффером.

Пфеффер воспользовался найденным в 1867 г. Траубе способом изготавливать перегородки, проницаемые для воды и непроницаемые для некоторых растворов. Подобного рода полупроницаемую перегородку Пфеффер изготовил, взяв пористый сосуд из необожжённой глины, который после тщательной промывки наполняется раствором железистосинеродистого калия $[K_8Fe_2(CN)_{12}]$ и погружается в раствор медного купороса. Эти два раствора диффундируют друг в друга и в порах сосуда образуют полупроницаемую перегородку. После смывания растворов сосуд готов к эксперименту.

Эксперимент Пфеффера состоял в том, что сосуд заполнялся раствором сахара и закрывался сверху трубкой, переходящей в манометрическую. При помещении сосуда с раствором в чистую воду наблюдалось проникновение воды через полупроницаемую плёнку, тогда как раствор сахара через неё не проходил. Приток воды в сосуд будет продолжаться до тех пор, пока избыточное давление раствора не уравновесит стремление проникнуть в раствор. Это давление и называется осмотическим. Пфеффер нашёл, что для небольших концентраций (от 1 до 6%) осмотическое давление пропорционально концентрации. В частности для 1% раствора сахара при температуре $6^{\circ},8\text{ C}$ осмотическое давление равно 505 мм Hg .

Эти наблюдения Пфеффера и были подвергнуты теоретическому анализу Вант-Гоффом в упомянутой работе. Вант-Гофф показал, что осмотическое давление разведённого раствора определённой концентрации равно тому давлению, которое оказало бы равное число грамм-молекул идеального газа в объёме, равном объёму растворителя при температуре раствора. Вант-Гофф доказал этот закон, основываясь на термодинамических соображениях, совершенно не зависящих от природы тех причин, которые обуславливают физическую природу осмотического давления. В изложении одного из современных этой эпохе авторов (Ветгэма) эти соображения выглядят так:

«Какого бы взгляда на основную природу раствора мы ни держались, мы должны представлять себе растворённое вещество рассеянным по всему объёму растворителя в виде отдельных частичек. Природа взаимодействия между растворённым веществом и растворителем неизвестна и, может быть, и непознаваема; но, каково бы ни было это взаимодействие, каждая частичка растворённого вещества будет влиять только на небольшую сферу растворителя, лежащую непосредственно вокруг неё. Таким образом, раствор можно считать состоящим из известного числа небольших систем, из которых каждая в свою очередь состоит из частички растворённого вещества,

¹ Ф. Энгельс, Дialeктика природы, 1952, стр. 44.

окружённой атмосферой растворителя, каким-то образом подчинённой своему ядру.

В концентрированном растворе эти малые сферы будут пересекать друг друга и прибавление растворителя будет влечь за собой некоторую перемену во взаимодействии между растворённым веществом и растворителем. Но при дальнейшем разведении раствора настанет момент, когда эти сферы перестанут достигать друг друга и прибавление большего количества растворителя будет просто увеличивать их взаимное расстояние, не действуя на внутреннюю структуру.

Таким образом, в ненасыщенном растворе перераспределение энергии системы при дальнейшем разведении раствора будет происходить только от затраты её на разделение частиц растворённого вещества; оно не будет зависеть от природы взаимодействия — какого бы то ни было — между растворённым веществом и растворителем. Изменение энергии, таким образом, не будет зависеть от природы растворителя и останется одно и то же, будет ли этим растворителем вода, алкоголь или любая другая жидкость. Оно остаётся тем же даже тогда, когда растворитель, если это возможно, совершенно устранился и растворённое вещество получается в газообразном состоянии¹.

Такова причина этой независимости осмотического давления от природы раствора. Но, как указывал Менделеев: «Чем больше будет частиц, т. е. чем крепче будет становиться раствор, тем более должны будут выступать особенности, зависящие от состава и от отношения веществ к частицам растворителя, так как распределение одних частиц в среде других не может не зависеть от их взаимного чисто химического воздействия». В сильных растворах, как и в реальных газах, следует искать влияния молекулярных сил, обусловленных структурой молекул; в разбавленных же растворах, как и в идеальных газах, это влияние игнорируется. В тесной связи с законами Вант-Гоффа находятся и законы Рауля, так что если выполняется один, то с необходимостью выполняются и другие. Приведем поясняющие этот факт соображения Аррениуса в изложении Перрена:

«Пусть в пространстве, где напряжение силы тяжести g и давление воздуха равно нулю, вертикальный столб раствора отделён от чистого растворителя полупроницаемой перегородкой.

Пусть раствор содержит n грамм-молекул растворённого вещества (не летучего) на N грамм-молекулу растворителя. Предположим, что равновесие установлено и разность уровней есть h . Пусть d — средняя плотность пара, D — значительно большая плотность самого растворителя (приблизительно равная плотности раствора). Пусть p и p' — давление пара, раствора и растворителя. Тогда, по определению осмотического давления P , давление на дно раствора будет $(p + P)$. По основной теореме гидростатики, применённой к раствору и пару, будем иметь:

$$p - p' = gh d;$$

$$p + P = p' + gh D.$$

Отсюда, исключая gh , получим приближённо

$$P = (p - p') \frac{D}{d} = \frac{p - p'}{p} \cdot \frac{p}{d} \cdot D,$$

¹ Ветгэм, Современное развитие физики, М., 1912, стр. 129.

т. е., по приведённому выше закону Рауля,

$$P = \frac{n}{N} \frac{p}{d} \cdot D.$$

Пусть v будет объём 1 грамм-молекулы M растворителя в газообразном состоянии (так что $\frac{p}{d} = \frac{pv}{M}$), при давлении p ; заметим далее, что $\frac{NM}{nD}$ — объём V , который занимает в растворе грамм-молекула растворённого тела. Следовательно,

$$PV = pv,$$

а это и есть закон В а н т - Г о ф ф а¹.

М. П л а н к, применяя метод Гиббса к слабым растворам, нашёл общее уравнение термодинамического равновесия системы из произвольного числа компонент, из которого в качестве следствий получаются: зависимость степени диссоциации от температуры, закон Оствальда о зависимости электропроводности электролитов от концентрации, закон Клапейрона-Клаузиуса, закон Вант-Гоффа для повышения точки кипения раствора или понижения точки замерзания, закон Вант-Гоффа для осмотического давления и ряд других результатов, полученных специальным образом.

«Выведенные здесь соотношения — заключает Планк свою лекцию по термодинамической теории растворов — легко могут быть увеличены и обобщены ... достоинство употреблённого здесь приёма заключается в том, что необходимые и достаточные условия содержатся в ур. (6) (т. е. общем уравнении термодинамического равновесия, полученном Планком. — П. К.) и все они получаются из этого уравнения прямым и притом однообразным путём»².

Успехи физического подхода к проблемам растворов, однако, не привели ещё к полной победе физической точки зрения, и в 1911 г. проф. Л. А. Ч у г а е в в статье о растворах, написанной им для издания «Итоги науки в теории и практике», писал: «нельзя не признать, что теории, которая бы позволила найти точки соприкосновения между отдельными взглядами и течениями, касающимися сущности растворимого состояния вещества, теории, которая бы охватывала и удовлетворительно объясняла все разнообразные стороны этого сложного вопроса — ещё не существует в науке»³.

Но уже в это время наметились контуры решения задачи. Чугаев предвидит, что создание такой теории «дело ближайшего будущего». Он видит её решение в познании природы молекулярных сил, причём «даже не исключена возможность, что по своей природе они п р и н ц и п и а л ь н о (подчеркнуто Чугаевым) не будут отличаться от тех, коими обуславливается и образование химических соединений».

Указав, что силы, обуславливающие явления ассоциации в таких жидкостях, как вода, спирты, «повидимому, как раз стоят на рубеже между областями физики и химии», Чугаев видит в этом факте залог того, что в будущем связь между химической и физической стороной природы растворов станет ещё более тесной. Развитие науки подтвердило это предвидение выдающегося химика.

¹ Ж. Перрен, Атомы, ОНТИ, 1932, стр. 44—45.

² М. Планк, Теоретическая физика, стр. 51—52.

³ Итоги науки в теории и практике, т. II, изд-во «Мир», 1914, стр. 462.

Другой стороной «механики молекул», привлечшей внимание исследователей этой эпохи, было учение о критическом состоянии — новом и загадочном виде физического состояния, о котором шли длительные дискуссии среди физиков того времени. История открытия критического состояния изложена сжато и объективно в «Очерке развития наших сведений о газах» А. Г. Столетова в 1879 г., так сказать по свежим следам (первая статья Эндрюса появилась в 1869 г., вторая в 1876 г.), и мы приведём её здесь без изменения, опустив только сноски и иностранную транскрипцию имён, приводимую Столетовым в скобках.

«В 1822 г. Каньяр де ла Тур нагревал различные жидкости (воду, эфир, алкоголь) в запаянных стеклянных трубках. До известного предела нагревания вещество оставалось частью в жидком состоянии, частью в виде паров; но при некоторой температуре оно делалось однородным, без всякого следа раздела между жидкостью и паром. Всё вещество представляло собой густой пар или лёгкую жидкость, занимая объём немного (в два-четыре раза) больше первоначального объёма жидкости. Давление этого пара Каньяр мог определить — оно было весьма велико (119 ат в случае алкоголя).

Температура, при которой происходило такое явление, была 200° для эфира, около 260° для алкоголя, около 360° для воды.

Казалось, что при этих температурах сказанные вещества никаким давлением не могут быть сжижены и что при температурах ещё более высоких сжижение было бы тем не менее возможно.

В 1860 г. проф. Менделеев, исходя из исследований совсем иного рода, пришёл к убеждению, что для всякой жидкости есть такой высший предел температуры, далее которого она остаётся паром или газом, каково бы ни было внешнее давление. Эту температуру он называет абсолютной точкой кипения; цифры таких температур, по Менделееву, довольно близки к результатам Каньяра (кроме случая воды).

С 1861 г. начинается ряд работ Томаса Андруса (Эндрюса. — П. К.), вполне подтвердивших эти соображения. Андрус выбрал предметом особенно подробного исследования углекислоту, полное описание работы появилось в 1869 г. и произвело сильное впечатление.

Андрус заключает газ в стеклянную трубочку, с одного конца запаянную, и запирает его каплей ртути. Трубочка вправляется в закрытый сосуд с водой, которую можно сдавливать посредством випта, давление через воду и ртуть передаётся газу. Объём, давление и температура газа наблюдаются.

Эти опыты, несомненно, показали существование такой температуры, при которой (и выше которой) углекислый газ невозможно осадить. Эту температуру Андрус называет критической температурой углекислоты, она около 31°С. Ещё при 30°,9 известное давление (около 75 ат) заставляет углекислоту частью осаждаться, и мы замечаем в трубочке жидкий слой под парами, но при 31°,1 — даже под давлением 400 ат — незаметно, чтобы вещество делилось на пар и жидкость; оно остаётся совершенно однородным.

Явления, представляемые углекислотой, повторяются и на других веществах»¹.

В этом месте Столетов делает сноску с указанием на последние определения критических температур: «Особенно подробно исследована Янсенем закись азота; критическая температура её 36°,4 (Beiblatter zu den Annalen

¹ А. Г. Столетов, Собр. соч., т. II, стр. 150—151.

d. Physik u. Chemie, 1878, p. 136). Критическая точка эфира и некоторых других жидкостей определена проф. Авенариусом).

Основной вывод, к которому пришёл Эндрюс (Андрус в транскрипции Столетова) в своей первой статье «О непрерывности газообразного и жидкого состояния вещества» сформулирован им в следующих выражениях:

«... газообразное и жидкое состояния суть только далеко отстоящие стадии одного и того же состояния материи, и они способны переходить друг в друга путём непрерывного изменения»¹.

Из результатов Эндрюса вытекало одно важное следствие. Уравнение состояния Бойля-Мариотта-Гей-Люссака, объединённое Клапейроном в единое уравнение, и обобщённое Менделеевым с учётом закона Авогадро-Жерара в ту форму, какую обычно называют уравнением Клапейрона, а правильнее называть уравнением Клапейрона-Менделеева, не удовлетворяет опытам Эндрюса. Оно приближённо охватывает только ту часть изотерм, которая относится к области ненасыщенных паров. Поэтому необходимо было найти более общее уравнение, охватывающее и новые результаты о непрерывном переходе из газообразного состояния в жидкое.

Эндрюс даже думал о более общей задаче, «о возможной непрерывности твёрдого и жидкого состояния материи». Однако теория конденсированных состояний до сих пор представляет чрезвычайно сложную проблему, и некоторые авторы полагают, что непрерывный переход из твёрдого кристаллического состояния в жидкую фазу принципиально невозможен. Попытка же обобщения уравнения состояния газов, с тем чтобы это уравнение могло отражать и факт непрерывного перехода газообразного состояния в жидкое, была предпринята вскоре после исследований Эндрюса.

Уже Ломоносов предвидел, что при больших давлениях должны сказываться отступления от закона Бойля-Мариотта, вследствие влияния собственного объёма частиц. В 1873 г. Ван-дер-Ваальс в своей диссертации «О непрерывности газообразного и жидкого состояния» впервые сделал попытку учесть как собственный объём молекул, так и силы взаимного сцепления между ними. Рассуждения Ван-дер-Ваальса привели его к общеизвестной формуле:

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v-b) = RT.$$

Это уравнение предсказывало существование критического состояния определяемого значениями

$$p_c = \frac{a}{27b^2}, \quad v_c = 3b, \quad T_c = \frac{8}{27} \frac{a}{bR}.$$

Если выразить объём, давление и температуру в этих величинах

$$p = \pi p_c, \quad T = \tau T_c, \quad v = \omega v_c$$

(величины π , τ , ω Ван-дер-Ваальс назвал «приведёнными» параметрами), то уравнение состояния принимает вид, не содержащий индивидуальных для каждого вещества констант a и b :

$$\pi = \frac{8\tau}{3\omega - 1} - \frac{3}{\omega^2}.$$

¹ Томас Эндрюс, О непрерывности газообразного и жидкого состояния, ОНТИ, 1933, стр. 49.

Состояния двух веществ с одинаковыми приведёнными параметрами называются соответственными. Из последнего уравнения вытекает закон соответственных состояний: если два каких-либо из приведённых параметров двух веществ совпадают, то совпадают и третьи и их состояния будут соответственными.

Уравнение Ван-дер-Ваальса хотя и описывало качественно переход из газообразного состояния в жидкое и предсказывало существование кри-

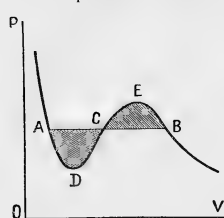


Рис. 149

тической точки, однако не давало полного совпадения с опытом. Наиболее резким расхождением теоретической изотермы Ван-дер-Ваальса при температурах ниже критических было наличие «завитка» в той области, где существует термодинамическое равновесие между паром и жидкостью и для которой опытная изотерма — прямая, параллельная оси абсцисс (объёмов).

В 1875 г. Максвелл указал простой способ проведения этой прямой. Пусть A и B — соответствующие точки изотермы, из которых A — граничная точка кривой, относящейся к жидкой фазе, B — граничная точка кривой, относящейся к газообразной фазе (рис. 149). Совершим циклический переход из A в B и обратно сначала по теоретической кривой $ADCB$, а затем по прямой BCA . Предполагая этот процесс обратимым, имеем:

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = 0,$$

так как

$$T = \text{const}, \quad \oint \delta Q = 0,$$

но $\delta Q = du + pdv$; следовательно,

$$\oint (du + pdv) = 0 \quad \text{и} \quad \oint pdv = 0,$$

или

$$(1) \int_A^B pdv + (2) \int_B^A pdv = 0.$$

Первый интеграл, взятый по теоретической изотерме, представит площадь фигуры, ограниченной изотермой и ординатами, второй интеграл — площадь соответствующего прямоугольника. Из равенства площадей следует:

$$\text{пл. } ADC = \text{пл. } CEB.$$

Геометрическое равенство площадей выражается аналитически формулой Максвелла-Клаузиуса:

$$\int_A^B pdv = p_0(v_2 - v_{ж}).$$

Ввиду того, что формула Ван-дер-Ваальса не точно следует опыту, Клаузиус в 1880 г. предложил формулу

$$p = \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{T(v+c)^2},$$

а в 1881 г. ещё более усложнённую формулу

$$p = \frac{RT}{v-b} - \frac{aT^{-a} - B}{(v+c)^2}.$$

Изотермы первой формулы Клаузиуса имеют примерно такой же вид, как и изотерма Ван-дер-Ваальса, и дают критическую точку, определяемую значениями:

$$v_c = 3b + 2c;$$

$$p_c^2 = \frac{1}{216} \frac{aR}{(b+c)^2};$$

$$T_c^2 = \frac{8}{27} \frac{a}{R(b+c)}.$$

Для «завитка» изотермы Клаузиуса также справедливо уравнение Максвелла-Клаузиуса:

$$\int_A^B p dv = p_0 (v_z - v_{ж})$$

и прямая часть опытной изотермы также отсекает от теоретической изотермы равновеликие площади. Многие авторы (Планк, Столетов) предпочитали формулу Клаузиуса, как дающую более удовлетворительное согласие с опытом, чем формула Ван-дер-Ваальса.

Наибольшие трудности возникали в исследовании вопроса о критическом состоянии. Выдвигались возражения против самого факта существования однородного состояния в критической точке, и, наоборот, высказывались утверждения о неоднородности вещества в критическом состоянии. Например, Жамен в 1883 г. писал:

«Начиная с критической точки и выше, жидкость смешивается и сливается со своим насыщенным паром; начиная с критической точки и выше, не существует больше скрытой теплоты; начиная с критической точки и выше, жидкое состояние сливается с газообразным»¹.

Баттели в 1893 г. определял критическую температуру, исходя из молекулярных представлений: критическая температура есть та, при которой сцепление между жидкими частицами настолько уменьшено, что они уже не сдерживаются вместе, но распространяются по всему занимаемому пространству»².

Следует отметить, что это определение, справедливо критикуемое Столетовым за его расплывчатость, близко подходит к наблюдению Менделеева, заметившего исчезновение поверхностного натяжения при «температуре абсолютного кипения». Баттели считал, что ему удалось установить признаки неоднородности вещества при критической температуре и выше неё, и потому полагал, что объяснение критического состояния следует искать в «распадении молекулярных групп».

¹ А. Г. Столетов, Собр. соч., т. I, стр. 291.

² Там же, стр. 309—310.

Б. Б. Голицын в своей статье того же 1893 г. писал, что «при температурах гораздо выше критической... и при почти одинаковом давлении вещество может иметь две (или, быть может, несколько) различных плотностей». При этом существование самого критического состояния не отрицается, отрицается только однородность вещества при этом состоянии.

Следует отметить, что последующее развитие физики подтвердило оспаривавшееся Столетовым предположение о возможной неоднородности при равенстве плотностей. В 1933 г. Павел Сигизмундович Эренфест изучая свойства жидкого гелия, пришёл к выводу о возможности фазовых переходов второго рода, осуществляемых без выделения скрытой теплоты

и без изменения объёма, однако другие физические свойства (например, теплоёмкость) могут меняться скачком. В свете новых исследований соображения Голицына оправдываются, равно как и его критика оптического метода, о которой мы скажем ниже.

Но в рассматриваемую эпоху пора для этих более глубоких обобщений не настала. Необходимо было внести ясность и определённую в это новое понятие, дать твёрдые опорные пункты эксперименту, указать источники возможных ошибок. Эту задачу и выполнил Столетов в своих статьях по критическому состоянию, появившихся в промежуток времени с марта 1882 г. до ноября 1893 г. с перерывом с марта 1882 г. по декабрь 1891 г.

Существовали следующие методы определения критической постоянной:

1. Метод изотерм (Эндрюса), заключается в том, что при определённых температурах исследуется зависимость между p и v и чертится полученная изотерма на плоскости p, v (рис. 150). В полученном семействе изотерм находят пограничную между теми изотермами, в которых имеется прямолинейная часть, соответствующая равновесию жидкого и газообразного состояния, и изотермами, не имеющими такого участка. Эта пограничная изотерма и соответствует критической температуре. Она касается в точке K так называемой пограничной кривой AKB , отграничивающей область равновесия жидкой и газообразной фаз от областей чисто жидкой фазы (слева от AKB) и чисто газообразной фазы (справа от AKB). Точка касания K соответствует критическому состоянию.

Столетов указал со всей ясностью и определённой, что достижение критической температуры ещё вовсе не означает того, что достигнуто критическое состояние. Оно для данной массы газа (что также подчёркивает Столетов) определяется ещё и давлением.

2. Способ мениска (Каньяр де ла Тура). Жидкость помещается в закрытой трубке, из которой тщательно удаляют воздух и следы других газов, так что свободное от жидкости пространство трубки заполнено парами жидкости. При нагревании трубки в воздушной ванне при достижении критической температуры мениск исчезает. Это исчезновение сопровождается сложными оптическими явлениями. А. И. Надеждин — киевский физик, много и успешно работавший над исследованием критического состояния

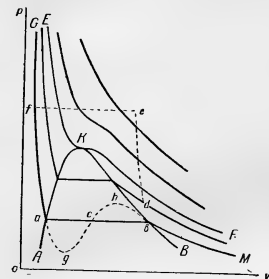


Рис. 150

(ему, в частности, принадлежит первое прямое определение критической температуры воды, сделанное им 7 марта 1885 г.), так описывает явления, происходящие при исчезновении мениска:

«Уничтожение раздела между паром и жидкостью где-нибудь посредине трубки сопровождается следующими явлениями: за несколько времени до исчезновения мениска жидкость начинает сильно кипеть, но скоро густая муть от пузырьков заменяется родом тумана, в жидкости и вне её появляются быстродвигающиеся струйки, и, наконец, раздел делается незаметным. Но если трубочка с жидкостью не нагревается равномерно по всей своей длине, то появление тумана и струек не сопровождается немедленным исчезновением раздела; последний продолжает подниматься в более холодную часть трубки, где и исчезает иногда у самого края. Поэтому особенно важным является наблюдение обратного перехода пара в жидкость при медленном охлаждении.

Как можно было заметить из наблюдений над несколькими десятками веществ, при объёме жидкости, близком к нормальному, переход совершается таким образом. Вначале посредине трубки появляется лёгкая муть (голубоватая в отражённом свете и желтоватая в пропущенном); муть эта темнеет, делается опаловой, затем молочнобелой; трубка становится непрозрачной, и, наконец, появляется сильно кипящая жидкость.

Когда жидкости взято больше, обратный переход также начинается голубоватой мутью, которая понемногу темнеет, но мы не замечаем непрозрачной мути по всей длине трубки. Густая муть показывается сверху, где тотчас же виднеется опускающаяся жидкость, с уровнем которой муть и понижается, пока не достигнет конца трубки.

При малом начальном объёме мы опять-таки не замечаем появления густой непрозрачной мути; здесь, после лёгкого тумана, жидкость является в форме дождя, сыплющегося сверху, от более холодных частей трубки.

Таким образом, как видим, нормальному критическому объёму будут соответствовать появление и исчезновение мениска где-нибудь посредине трубки, а не вблизи её концов, и густая интенсивная муть по всей длине трубки, сопровождающая обратный переход.

Этими признаками можно воспользоваться для определения критического объёма¹.

Описанное здесь Надеждиным явление помутнения вблизи критической точки получило название критической опалесценции и свидетельствует о дисперсной структуре среды вблизи критической точки.

На роль количества жидкости в этом методе указал Столетов и дал объяснение того факта, что место исчезновения мениска зависит от количества жидкости, которое может изменяться в довольно широких пределах.

Пусть AKB — критическая изотерма, которой соответствует критическая температура ϑ . В критической точке K её касается пограничная кривая $MSKHN$. Пусть $CFHD$ — другая изотерма, соответствующая температуре t ниже критической. Пусть v — объём трубки, в которой нагревается жидкость. Если количество жидкости взято таким, чтобы удовлетворялось равенство $mv_c = v$, где v_c — критический объём 1 г, то возрастание давления идёт по прямой ubK , исчезновение мениска будет как раз посредине трубки и вещество переходит в критическое состояние, изображаемое точкой K (рис. 151).

Если жидкости взято меньше, чем в первом случае ($mv_c < v$), тогда при критической температуре вещество займёт объём v , больший её критиче-

¹ А. Г. Столетов, Собр. соч., т. I, стр. 304.

ского, и повышение давления идёт по прямой *mor*. Жидкость испаряется в точке *o* ранее достижения критической температуры, мениск будет исчезать ближе к нижнему краю трубки. Если жидкости взято больше, чем необходимо для того, чтобы объём *v* соответствовал её критическому объёму ($mv_c > v$), то изменение давления происходит по прямой *dfh*; в точке *g* вся масса перейдёт в жидкое состояние, которое по достижении критической температуры (точки *h*) незаметно перейдёт в газообразное состояние; мениск должен исчезнуть наверху трубки. Однако он исчезает обычно где-то посередине. Это объясняется, по Столетову, ограниченной чувствительностью глаза, не различающего изменения показателей преломления в точках *f* и *n*, где ещё сосуществуют разные фазы.

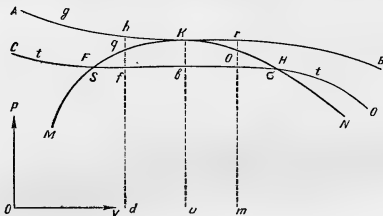


Рис. 151

Если $t < \vartheta$ — температуры, при которой глаз перестаёт видеть мениск, и σ — удельный объём насыщенного пара при этой температуре, s — удельный объём жидкости, то весовое количество жидкости m может меняться в пределах:

$$\frac{v}{s} < m < \frac{v}{\sigma}.$$

Столетов показал, что при небольших изменениях температуры вблизи критической точки s и σ могут существенно отличаться. Так, для углекислоты $\vartheta = 31^\circ \text{C}$ и при $t = 30^\circ$ $\frac{\sigma}{s} = 1,485$. Этим фактом Столетов объяснил появление кажущейся двухфазности во многих опытах по определению критического состояния.

Поэтому задача определения критического объёма является нелегкой. М а т и а с в 1890 г. предложил воспользоваться так называемым законом параболы. Если откладывать по оси абсцисс температуры, а по оси ординат плотность жидкости d и плотность её насыщенного пара σ , то с увеличением температуры d уменьшается, а σ растёт и обе кривые сливаются в точке *C* (рис. 151 а). Получившаяся кривая *ACB* напоминает параболу с вершиной в точке *C*. Линия, соединяющая середины хорд этой кривой, параллельных оси ординат, есть прямая, наклоненная к оси абсцисс под весьма малым углом α ($\tan \alpha = \beta$). Для некоторой температуры t ордината прямой

$$y = \frac{1}{2} (d + \sigma) = \beta t + b.$$

Для критической точки C температура ϑ , плотность Δ .

$$y_c = \Delta = \beta\vartheta + b.$$

Отсюда

$$y - \Delta = \beta(t - \vartheta); \quad y = \Delta + \beta(T - T_c).$$

Таким образом, определив для какой-либо температуры $T = t + 273^\circ$ плотности жидкости и пара d и δ , найдём y , а зная критическую температуру $T_c = \vartheta + 273$, найдём критическую плотность Δ ; отсюда и определяется критический объём.

А. И. Надеждин предложил весовой способ определения критической температуры, основанный на представлении об однородности критического состояния. Трубка AA вставлена в оправу, снабжённую опорой в виде трёхгранной призмы, как в коромысле весов. Подобно коромыслу трубка может качаться вокруг ребра призмы, опёртого на плоскость металлического подвеса B . С помощью гирьки, подвешенной к концу D , пустая трубка устанавливается горизонтально. Если один конец трубки заполнен жидкостью, а другой её паром, то горизонтальное положение нарушено. Прибор помещается в воздушную ванну; когда её температура станет равной критической, трубка примет горизонтальное положение.

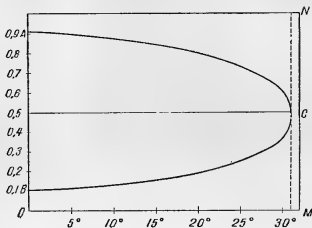


Рис. 151а. К методу парабол

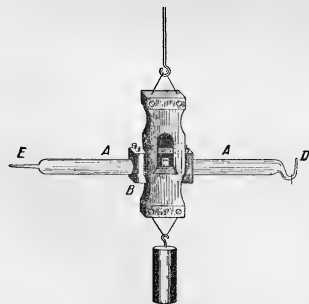


Рис. 152. Прибор А. И. Надеждина для определения критической температуры

Столетов, сознавая недостатки менискового метода (он называл его оптическим), считал его преимуществом то, что он исходит из ясной идеи об однородности критического состояния. Исчезновение мениска свидетельствует, что показатель преломления жидкости в ближайшем соседстве с мениском (это подчёркивал Голицын) становится равным показателю преломления насыщенного пара, а следовательно, и плотности жидкости и пара становятся равными. Но Голицын сомневается в справедливости такого заключения, имея в виду наличие аномалий вблизи

критической точки. Поэтому он разрабатывает метод, позволяющий непосредственно определять показатель преломления в обеих фазах, как при температурах ниже критической, так и при более высоких и притом в различных слоях. Из этих данных уже и выводится заключение о том, находится ли



Б. Б. Голицын

вещество в критическом состоянии при исчезновении мениска или нет, а также определяется критическая температура.

Идея метода Голицына состоит в том, что сама трубка вместе с заключающейся в ней жидкостью рассматривается как цилиндрическая линза. На внешней поверхности трубки наносятся две параллельные черточки, параллельные оси трубки, на расстоянии y друг от друга. После преломления в четырёх коаксиальных поверхностях (воздух—стекло; стекло—жидкость; жидкость—стекло; стекло—воздух) измеряется с помощью окулярного микрометра расстояние y_4 между изображениями черточек. Искомый показатель преломления x определяется по формуле:

$$\frac{1}{x} = A + B \cdot \frac{1}{y_4},$$

$$\text{где } A = \frac{1}{n_2} \left\{ 1 - \frac{R_2}{R_1} \right\} + \frac{1}{2n_1} \cdot \frac{R_2}{R_1}; \quad B = \frac{1}{2n_1} \cdot \frac{R_2}{R_1} \cdot y.$$

Здесь R_2 — внутренний радиус, R_1 — наружный радиус трубки, n_2 — абсолютный показатель преломления стекла трубки, n_1 — показатель преломления воздуха. Константы A и B предварительно определяются.

Второй метод, разработанный Голицыным, — метод призмы. Внутри вертикальной трубки помещается призма с весьма малым преломляющим углом, одна из граней которой вертикальна (параллельна оси трубки). Призма достаточно мала, чтобы в пространство между ней и стёклами трубки можно было помещать электромагнитную мешалку (рис. 153). Если n_1 — показатель преломления воздуха, n_2 — призмы, n_3 — стеклянных стенок трубки, α — преломляющий угол призмы, i_1, i_2, i_3 — углы падения, δ — угол отражения в призме, то из равенств

$$n_1 \cdot \sin \alpha = x \sin i_1; \quad x \sin i_2 = n_2 \sin i_3; \quad n_3 \sin i_3 = n_1 \sin \delta$$

и равенства $i_1 - i_2 = \alpha$ можно вывести соотношение

$$x^2 = \left(n_2 - n_1 \frac{\sin \delta}{\operatorname{tg} \alpha} \right)^2 + n_1^2 \sin^2 \delta,$$

откуда из измеренного значения δ и известных α, n_1 и n_2 можно определить x . В случае Голицына

$$\alpha = 7^\circ 17' 57'', \quad n_1 = 1,0003.$$

Полученная формула неудобна для вычислений и после ряда преобразований приводится к виду

$$x = \frac{n_1}{\sin \alpha} \sqrt{\left[\sin \delta - \frac{n_2}{n_1} \sin \alpha \cdot \cos \alpha \right]^2 + \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 \sin^4 \alpha}.$$

Полагая

$$P = \frac{n_2}{n_1} \sin \alpha \cdot \cos \alpha, \quad Q = \frac{n_2}{n_1} \sin^2 \alpha,$$

определим эти величины раз и навсегда для всего эксперимента. Далее, введя определённую из опыта переменную величину

$$R = P - \sin \delta$$

и имея в виду, что $\left(\frac{Q}{R}\right)^2$ — малая величина, развёртываем корень в ряд, сохраняя в нём члены низшего порядка

$$x = \frac{n_1}{\sin \alpha} R \left[1 + \frac{1}{2} \frac{Q^2}{R^2} - \frac{1}{4} \frac{a^4}{R^4} \right].$$

Третий членом можно также пренебречь, он вносит ничтожную поправку.

Так как эксперимент проводится при температуре 200°C и давлениях 40 ат , то к трубкам, стенки которых к тому же должны быть тщательно отшлифованы, предъявляются очень серьёзные требования. Голицыным были заказаны трубки фирме Пеллена (Дюбоска) в Париже и Гейслера в Бонне. После длительных проб фирма Гейслера изготовила достаточно удовлетворительные трубки, которые, однако, ещё не вполне соответствовали требованиям настоящей цилиндрической линзы и были, конечно, очень дороги. Опыт проводился с чистым этиловым эфиром. Заполненная эфиром трубка помещалась в термостат, средняя часть которого была заменена плоскопараллельными стёклами. Эксперименты по методу линзы показали, что с повышением температуры показатели преломления жидкой и газообразной фазы сближаются между собой, сходясь в критической точке. Критический показатель преломления для этилового эфира оказался приблизительно равным $x_k = 1,12$ и критические параметры получились равными: температура $t_k = 193^\circ,61 \text{ C}$, давление $p_k = 36,28 \text{ ат}$, объём $v_k = 3,84 \text{ см}^3$.

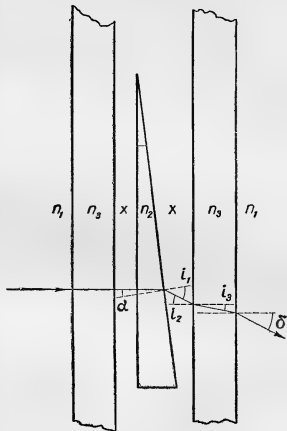


Рис. 153. К методу Б. Б. Голицына определения критической температуры

Голицын установил, что только тогда возможно получить надёжные значения для критической температуры, когда имеется в распоряжении хороший термостат и в продолжение эксперимента различные слои вещества энергично перемешиваются. На это обстоятельство при использовании метода мениска не обращалось должного внимания, вследствие чего различные наблюдатели получали различные значения критических температур.

Голицын проводил три ряда наблюдений: с обычными неотшлифованными трубками и со специально изготовленными трубками. Он установил, что кривая с обычной более тщательно отшлифованной трубкой при соблюдении всех необходимых предосторожностей в эксперименте хорошо совпа-

дает с кривой, полученной при работе со специальными трубками. Критическая температура при этом оказалась $193^{\circ},7 - 193^{\circ},8$, показатель преломления $x_k = 1,12$.

Далее он установил, что хотя вещество находится вблизи критической температуры и при прохождении через неё испытывает большие изменения, однако показатель преломления оказывается совершенно не зависящим от температуры и является только функцией общего объёма.

Голицын подробно исследовал формулу Лоренца

$$\frac{x^2 - 1}{x^2 + 2} \cdot \varphi = C$$

и нашёл, что очень хорошо представляет связь между показателем преломления и объёмов в очень широкой области температур как для жидкого, так и для газообразного состояний.

Вместе с тем Голицын нашёл, что если слои вещества не перемешивать, то при температуре несколькими градусами ниже критической показатель преломления в одной и той же фазе в различных слоях сохраняет одно и то же значение.

Однако в непосредственной близости критической температуры и выше её значения показателя преломления в нижних слоях выше, чем в верхних. Среднее значение этих показателей преломления для $t > t_k$ в общем хорошо совпадает с теми значениями, которые соответствуют общему объёму, занятому веществом. Отсюда следует, что выше критической температуры вещество при известных условиях может иметь различные плотности при одних и тех же температуре и давлении. Наибольшие изменения плотности существуют вблизи критической температуры (35%); около 3° выше её существуют ещё изменения в 23% и около 5° выше t_k существуют ещё изменения в 14% плотности.

«Повидимому, следует предположить, — пишет Голицын, — что при известных условиях может существовать жидкая фаза так же выше критической температуры — явление, совершенно аналогичное запаздыванию испарения. Скачкообразное изменение плотности в том месте, где мениск при прохождении через критическую точку исчезал, кажется подтверждающим правильность этого допущения»¹.

Вместе с тем Голицын показал, что метод линзы «оказывается очень подходящим для определения критической температуры t_k вещества». Он указывает, что в этом методе «могут быть использованы самые обыкновенные трубки и все-таки дающие возможность определения t_k от $0,^{\circ}1 - 0,^{\circ}2 \text{ С}^{\circ}$ ».

На возможную неоднородность критического состояния указывал и Авенариус, предложивший определять критическое состояние не как точку, в которой плотности жидкости и пара одинаковы, а как точку, в которой внутренняя скрытая теплота испарения жидкости равна нулю. Внутренняя скрытая теплота испарения есть часть полной теплоты испарения, остающаяся за вычетом работы на увеличение удельного объёма S жидкости до удельного объёма σ насыщенного пара. Так как эта работа равна

$$p(\sigma - s),$$

а полная теплота испарения по формуле Клапейрона-Клаузиуса

$$\lambda = T(\sigma - s) \frac{dp}{dT},$$

¹ Известия Инж. Акад. Наук, т. XI, № 3, 1899, стр. 195—196.

² Там же, стр. 194.

то внутренняя скрытая теплота испарения

$$\rho = p(\sigma - s) \left[\frac{T}{p} \frac{dp}{dT} - 1 \right].$$

Авенариус, заключив из своих опытов, что $p = 0$, причём, по его мнению, равенства σ и S в опытах не наблюдалось, полагает, что ρ обращается в нуль благодаря обращению в нуль в критической точке выражения

$$\frac{T}{p} \frac{dp}{dT} - 1.$$

Столетов указал, что вблизи критической точки $\frac{d\sigma}{dT}$ и $\frac{ds}{dT}$ меняются очень быстро, стремясь к бесконечности, как это вытекает из уравнения Ван-дер-Ваальса; поэтому при весьма малой разности $T - T_k$ разность $\sigma - S$ удельных объёмов жидкости и пара ещё может оставаться конечной. С другой стороны, если эта разность равна нулю, то $p = 0$ и $\lambda = 0$.

Маттиас показал для углекислоты, что λ стремится к нулю при приближении к критической температуре. Он же нашёл, что при приближении к критической точке теплоёмкость неограниченно возрастает.

Выясняя термодинамическую сущность дела и выступая против преждевременной спекуляции на молекулярной теории, которая в тогдашних условиях могла привести вообще к ликвидации понятия критической точки, Столетов был прав.

Насколько неясно многие из тогдашних физиков представляли себе термодинамическую суть дела, было видно из того, что критическую точку, характеризующую определённое состояние и, следовательно, определяемую тремя координатами p_c , v_c , T_c , смешивали с критической температурой. Не представляя образа термодинамической поверхности состояния $(p, v, T) = 0$, допускали, что кривая $p = p(T)$, получающаяся в сечении этой поверхности плоскостью $v = v_c$, может быть продолжена за точку $T = T_k$.

Столетов разъяснял все эти вопросы и намечал в качестве ближайшей программы исследования критического состояния, во-первых, выработать такие уравнения состояния, «которыми возможно точно изображались бы результаты опытов», во-вторых — «формулировать теоретическое обоснование таких уравнений». «Что касается экспериментальной стороны дела, — указывал Столетов, — для определения критических условий весьма важно: с одной стороны, выбирать возможно чистые вещества без примесей, с возможной постепенностью изменять температуру и точно оценивать её, хотя бы для данной части объёма (если нельзя вполне ручаться за её одинаковость во всём объёме); с другой — усовершенствовать оптический способ наблюдения малейшей неоднородности вещества. Наконец, следует сопоставлять различные методы (исследуя их параллельно на одном и том же во всех отношениях веществе) и выясняя их относительные выгоды и неудобства»¹. Исследование Голицына отвечало духу этой программы.

Открытие критической температуры указало путь, которым следует идти при решении задачи о сжижении газов. Фарадей, успешно начавший решать эту задачу, правильно понял, что надо действовать и холодом и

¹ А. Г. Столетов, т. I, стр. 306.

давлением. Получив вначале жидкий хлор с помощью только давления, он затем обратил в жидкость целый ряд газов, применяя охлаждение посредством охлаждающих смесей. Ему не удалось обратить в жидкость воздух, кислород, азот, водород, окись углерода, окись азота, метан.

Натерер, применяя давления до 3600 ат, потерпел неудачу в своей попытке обратить в жидкость эти так называемые «постоянные газы».

Фарадей правильно оценил положение. В 1844 г. он писал:

«Г. Каньяр де ла Тур показал, что при известной температуре жидкость, подверженная достаточному давлению, делается прозрачным паром

или газом, имеющим одинаковую плотность с жидкостью. При этой температуре или несколько высшей нельзя ожидать, чтобы какое-нибудь повышение давления — исключая, быть может, чересчур сильного — могло обратить газ в жидкость. Как ни низка температура — 110°C , она, вероятно, выше такой температуры для водорода и, быть может, для азота и кислорода, и тогда никакое сжатие — без некоторого охлаждения далее той точки, какая достигнута до сих пор — не лишит их газообразного состояния»¹.

Открытие критической температуры подтвердило правоту Фарадея. Надо было искать способов получения низких температур. Эти способы были найдены.

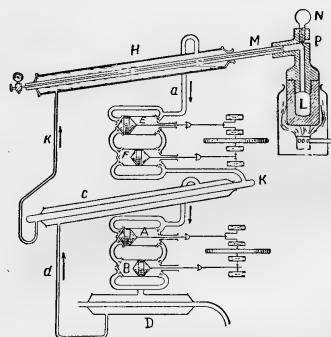


Рис. 154. Прибор Кальете для сжижения газов

24 декабря 1877 г. Парижская академия наук заслушала сообщение Кальете и Пикте о сжижении кислорода. Кальете ещё 2 декабря писал акад. Девилю: «считаю нужным сообщить Вам первому и не теряя ни минуты, что сегодня я дошёл до сжижения окись углерода и кислород; может быть, я не прав, говоря о с ж и ж е н и и, ибо при температуре, полученной через испарение сернистой кислоты, именно -29° , и при 300 атмосферах, я вижу не жидкость, а т у м а н, столь густой, что можно заключить о присутствии пара, весьма близкого к точке сжижения»².

Письмо Кальете, переданное в академию, было вскрыто 24 декабря и тогда же пришла телеграмма Пикте: «сегодня сжижен кислород при 300 атмосферах и 140° холода, соединенным действием кислот сернистой и угольной»³.

Способ Кальете основан на адиабатическом охлаждении при внезапном уменьшении давления. Сжатый в трубке, окружённой охлаждающей смесью ($t = -29^{\circ}$), кислород подвергался внезапному уменьшению давления от 300

¹ А. Г. Столетов, т. II, стр. 149.

² Там же, стр. 153.

³ Там же, стр. 154.

до 1 ат. При этом температура падала примерно до -200° и в трубке образовался туман.

Пикте получал уже устойчивые количества жидкости, подвергая интенсивному испарению жидкий сернистый ангидрид. Процесс сгущения кислорода по способу Пикте изображён на схеме (рис. 154). Здесь L — толстостенный сосуд, в котором добывается испытуемый газ (например, кислород получался нагреванием бертолетовой соли). Газ поступает в трубку

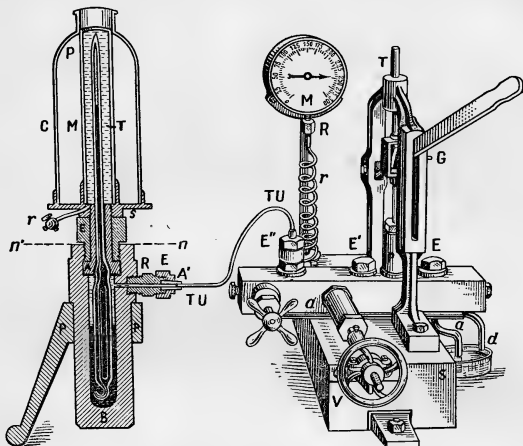


Рис. 155. Установка Пикте для сжижения газов

M , давление в которой по мере поступления новых порций газа непрерывно растёт. Трубка M окружена другой H , по которой непрерывно циркулирует испаряющаяся жидкая CO_2 . Циркуляция CO_2 поддерживается спаренным насосом E и F ; насос F создаёт разрежение, необходимое для быстрого испарения CO_2 , и нагнетает её в F , который в свою очередь подаёт её в трубку K , откуда она по k снова подаётся в H . Трубка K окружена трубкой C , по которой циркулирует испаряющийся жидкий SO_2 . Его циркуляция обеспечивается насосами A и B .

Метод Пикте, таким образом, является методом последовательного, или каскадного, охлаждения. Пустив в 9 утра 22 декабря свою установку, Пикте в 1 час 10 минут открыл кран. «Жидкая струя вырывается с большой силой в виде белой блестящей кисти, её окружает, особенно снизу, синеватый ореол. Длина жидкой кисти около 10 или 12 сантиметров, диаметр от $1\frac{1}{2}$ до 2...; слегка зажжённые угли, внесённые в струю, вспыхнули с неслыханной силой, разбрасывая искры во все стороны»¹.

¹ А. Г. Столетов, т. II, стр. 155.

В 1883 г. появилась первая работа Вроблевского и Ольшевского, посвящённая сжижению газов. Работая по методу Кальете и используя в качестве охладителя жидкий этилен, они получили жидкий кислород при $t = -130^{\circ}\text{C}$ и давлении 20 атм. В дальнейшем Вроблевский, используя кипящий кислород в качестве охладителя, получил жидкий азот и окись углерода.

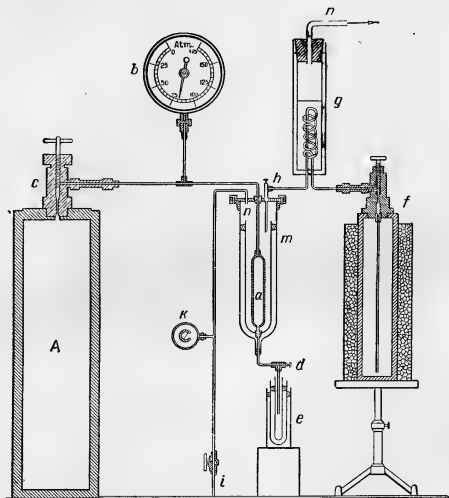


Рис. 156. Прибор Ольшевского для получения больших количеств жидкого кислорода или воздуха

В 1884 г. Вроблевский в Кракове получил сгущённые пары водорода. «На мгновение ока можно было видеть туман водорода, когда газ, предварительно охлаждённый до температуры кипения азота в пустоте, вдруг освобождался от давления в 180 атмосфер». Это мимолётное явление было воспроизведено Ольшевским. Но ни тому, ни другому не удалось получить жидкость в достаточном количестве. Вроблевский, продолжая свои эксперименты по сжижению водорода, погиб в 1888 г. от ожогов, полученных при взрыве¹.

Работы Вроблевского и Ольшевского подготовили почву для перехода

¹ Сигизмунд Антонович Вроблевский (1845—1888) — польский физик. Родился в Гродно. Учился в Киевском университете. За участие в польском восстании был заключён в тюрьму, затем сослан в Сибирь. По возвращении из ссылки уехал за границу. Учился у Гельмгольца в Берлине. Получил кафедру физики в Кракове, которую и занимал до своей смерти.

на новый путь получения низких температур. Этот путь заключался в использовании эффекта Джоуля-Томсона, или дроссельного эффекта.

Как известно, этот эффект заключается в том, что газ при продавливании через фильтр (дроссель) меняет температуру: газ либо охлаждался (положительный эффект Джоуля-Томсона), либо, наоборот, нагревался (отрицательный эффект). При обычных температурах все газы, за исключением водорода, обнаруживали положительный эффект. Выяснилось, что существует определённая температура (температура инверсии), при которой эффект переходит через нуль. Для водорода, как это было показано Ольшевским, точка инверсии лежит около -80° . Следовательно, если водород охладить ниже этой температуры и расширить адиабатически, то, вследствие положительного эффекта Джоуля-Томсона, он будет охлаждаться. Используя этот принцип, Дьюар 10 мая 1898 г. получил жидкий водород. На том же принципе основана машина Линде для получения

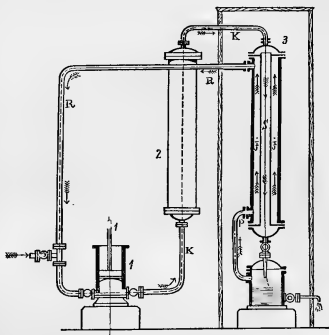


Рис. 156а. Схема устройства машины Линде

жидкого воздуха, обладающая производительностью несколько литров в час. В этой машине основной частью является двойной змеевик (длина 100 м, диаметр наружной трубы 10 см, внутренней 4 см). Воздух сжимается компрессором до 100 ат, поступает во внутреннюю трубку змеевика и, пройдя через вентиль, расширяется и охлаждается вследствие эффекта Джоуля-Томсона. Охлаждённый воздух идёт по внешней трубе змеевика, охлаждая, в свою очередь, идущий ему навстречу по внутренней трубе поток воздуха. После нескольких циркуляций воздух сгущается и стекает в сосуд, конструкция которого также принадлежит Дьюару. Таковы были первые шаги столь важной сегодня физики низких температур. Они дались физике ценой больших жертв и трудов. Начиная с Фарадея, ежесекундно подвергавшегося риску взрыва своих трубок, каждый из работников в этой трудной области науки рисковал своей жизнью и здоровьем. Вроблевский поплатился жизнью. Каммерлинг-Оннес, потративший годы на получение жидкого гелия и в конце концов получивший его в 1908 г., после 18-часового заключительного эксперимента должен был отдыхать несколько месяцев от переутомления. Много пришлось пережить и разочарований. 11 января 1878 г. Пикте дал телеграмму в Париж:

«Вчера сжижен водород. 650 атмосфер и 140 градусов холода. Отвердел через испарение. Перемежающаяся струя синего стального цвета, сильное падение дробы на землю с резким своеобразным звуком. Твёрдый водород сохранялся в трубке несколько минут. Рауль Пикте»¹.

¹ А. Г. Столетов, т. II, стр. 155.

Учёный мир уже торжествовал этот научный триумф, но выяснилось, что не только до отвердевания водорода — до его сжижения ещё далеко. Вроблевский погиб, не получив ещё водорода. Ольшевский определил его критическую температуру и впервые получил его в жидком виде в стальной трубке, но не увидел: удержать его снаружи было невозможно. Только Дьюару, располагавшему большими средствами Королевского института и изобретшему сосуд для хранения жидких газов, удалось впервые 10 мая 1898 г. увидеть жидкий водород в виде отдельной струйки в струе газа. После того как собрали около 20 кубических сантиметров жидкости, опыт прервался, так как выход был забит замёрзшим воздухом. Твёрдый водород был получен уже в XX в.

Столетов горячо приветствовал успехи в сжижении газов, он видел в этих успехах и победу материалистического научного мировоззрения. «Тела наиболее загадочные и неуловимые, тела, когда-то казавшиеся как бы переходом к миру сверхчувственному, окончательно приравнены к остальной материи», — писал Столетов¹. Одна из перегородок, сочинённых метафизикой, была снята прогрессом науки.

В докладах секции не нашли отражения успехи в области гидродинамики вязких жидкостей. Мы вкратце рассмотрим здесь результаты, достигнутые наукой в этой области к концу XIX столетия.

Законы вязкости (внутреннего трения) жидкостей были сформулированы Ньютоном в его «Началах» в 1687 г. Согласно закону Ньютона, сила внутреннего трения пропорциональна скорости относительного движения, пропорциональна поверхности прикосновения, вдоль которой совершается движение, зависит от свойств жидкости и не зависит от давления.

Силами вязкости интересовался М. В. Ломоносов, сконструировавший специальный прибор для их изучения. В дальнейшем как в XVIII, так и в XIX в. вопрос о справедливости закона Ньютона вызывал большие сомнения. Опыты ряда исследователей (Шези, Кулон, Жерар и др.) давали противоречивые результаты, теоретическая гидродинамика основывалась на уравнениях Эйлера, не рассматривающих силы вязкости.

В 1839 г. немецкий производитель работ Гаген и в 1840 г. французский врач Пуазейль изучали вязкое, так называемое «ламинарное» или слоистое течение жидкости в капиллярах. Они нашли, что в горизонтальных трубках под действием разности давлений устанавливается течение с наибольшей скоростью по оси, убывающей до нуля у стенок (прилипание) по параболическому закону:

$$u = \frac{A}{4\mu} (a^2 - r^2).$$

Здесь u — скорость на расстоянии r от оси, a — радиус трубки, μ — коэффициент вязкости, A — постоянная (течение Гагена-Пуазейля).

Количество жидкости, вытекающее из трубки в единицу времени, равно

$$Q = \frac{\pi}{8} \frac{A}{\mu} a^4.$$

Это формула Пуазейля.

В 1822 г. Навье и в 1845 г. Стокс вывели дифференциальное уравнение гидродинамики вязкой жидкости. В современной записи так называемое уравнение Навье-Стокса имеет вид:

$$\rho \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \rho (\bar{v} \text{ grad}) \bar{v} - \mu \Delta \bar{v} + \text{grad } p = \bar{F}.$$

¹ А. Г. Столетов, т. II, стр. 55.

Здесь F — сила, действующая на единицу объёма, $\vec{v}$ — вектор скорости, ρ — плотность жидкости, p — давление, μ — коэффициент вязкости, Δ — оператор Лапласа. Из этих уравнений Стокс получил свою известную формулу для сопротивления вязкости при равномерном движении шара в вязкой жидкости:

$$W = 6\pi\mu a q.$$

Здесь q — скорость движения, a — радиус шара, W — сила сопротивления.

Случай течения Гагена-Пуазейля также получается из уравнения Навье-Стокса. Однако эти уравнения считались совершенно неприменимыми к задачам гидравлики и техническим проблемам гидродинамики. Впервые они были использованы для решения технического вопроса русским учёным профессором и военным инженером Николаем Павловичем Петровым (1836—1920), положившим начало гидродинамической теории смазки. Его основополагающие работы по этому вопросу были опубликованы в 1883 г. в «Инженерном журнале».

Применяя уравнение Навье-Стокса и закон Ньютона и допустив далее, что оси шипа (цапфы) и подшипника совпадают, а также наличие скольжения на поверхности шипа и подшипника, Петров пришёл к формуле

$$F = \mu \frac{QU}{1 + \frac{\mu}{\lambda_1} + \frac{\mu}{\lambda_2}},$$

т. е. (приводим дословно формулировку Петрова): «При постоянной температуре смазывающей жидкости сила трения двух смазанных цилиндров пропорциональна коэффициенту внутреннего трения жидкости (μ), соответствующему данной температуре; пропорциональна величине поверхности взаимного прикосновения трущихся твёрдых тел (Q) и пропорциональна первой степени относительной скорости этих тел (U) на их поверхности прикосновения; она обратно пропорциональна сумме, состоящей из толщины слоя смазывающей жидкости и из суммы отношений коэффициента внутреннего трения к коэффициентам внешнего трения жидкости при данной температуре»¹.

Петров особенно подчёркивает, что это уравнение справедливо для случая ламинарного движения, «когда движение жидкости происходит так, как будто бы она состояла из безгранично тонких, круглых цилиндрических слоёв с одной общей осью, совпадающей с осью твёрдых цилиндров...»

Вопрос о том, при каких условиях возможен ламинарный режим течения жидкости, когда он нарушается и переходит в другой (турбулентный), был решён профессором Манчестерского университета физиком и инженером Осборном Рейнольдсом.

В 1883 г. Рейнольдс производил экспериментальные исследования течения жидкостей. Впуская окрашенную струйку жидкости во входное сечение трубы, он наблюдал её течение при различных диаметрах трубы и скоростях течения. При малых скоростях движение было ламинарным, в виде правильных слоёв; при больших скоростях появлялось направленное в стороны неправильное движение и окрашенная струйка разбивалась на множество извилистых, неправильных струек. Последний тип течения Рейнольдс назвал турбулентным.

¹ «Гидродинамическая теория смазки», Сборник работ, ГТТИ, 1934, стр. 137—138.

Применяя теорию подобия, основа которой была заложена ещё Галилеем и Ньютоном, Рейнольдс установил, что критерием, позволяющим судить о характере течения, является безразмерное число, так называемое число Рейнольдса:

$$R = \frac{va}{\nu}.$$

Здесь v — скорость течения, a — линейный размер, характеризующий данную установку (например, диаметр шара), $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ — кинематический коэффициент вязкости. Так называемое критическое число Рейнольдса лежит в области от 1200 (для неправильного входа) до 20 000 (закруглённый вход). При $R > R_{кр}$ течение турбулентное, при $R < R_{кр}$ — течение ламинарное. Результаты Рейнольдса имеют важное значение для экспериментальной аэродинамики; в частности, испытание моделей в аэродинамических трубах должно проводиться с равенством чисел Рейнольдса для модели и действительной машины.

Работы по гидродинамической теории смазки продолжали сам Н. П. Петров, затем Н. Е. Жуковский, указавший в 1886 г. на то, что допущение Петрова о совпадении осей шипа и подшипника не применимо в действительных условиях, О. Рейнольдс, уточнивший результаты Петрова, но получивший очень сложные, практически неудобные формулы, затем Зоммерфельд, Мичель, Жуковский и Чаплыгин. В нашу задачу не входит изложение всех этих результатов, отсылаем читателя к оригинальным работам, изданным на русском языке¹. Существенно, что гидродинамика вступила на путь синтеза опыта и теории, науки и практики, подготавливая будущие успехи кораблестроения и самолётостроения, в которых видную роль играли такие деятели отечественной науки, как Алексей Николаевич Крылов, Николай Егорович Жуковский, Сергей Алексеевич Чаплыгин.

Возникновение гипотезы квантов.

На третьей секции (оптика и термодинамика) В. Томсон произнёс речь «Об условиях образования волн в эфире посредством перемещений весомой материи», Ридберг сделал доклад о спектральных сериях, Карвалло о формулах дисперсии, Друде посвятил доклад оптическим свойствам металлов, Корню — скорости света, В. Вин — температуре и энтропии излучения, Лисммер — излучению чёрных тел, твёрдых тел и жидкостей, Принсгейм — излучению газов, Лебедев — давлению, вызываемому излучением; Липпман — принципу Карно и кинетической теории газов, Витц — прогрессу теории тепловых двигателей.

Если исключить два последних доклада, то нельзя не заметить, что все вопросы, обсуждаемые в этой секции, относились к области квантовой оптики, хотя гипотеза квант была сформулирована Планком несколькими месяцами позже конгресса. Правда, доклады Карвалло и Друде, в особенности последний, относились к развитию электромагнитной теории света и, следовательно, к «классической» физике, тем не менее это не лишает секцию существенно нового «предквантового» характера.

Успехи термодинамики и электромагнитной оптики привели к мысли об объединении этих двух направлений физики. Из этого синтеза и возникла теория квант. Поводом для её возникновения послужила проблема чёрного излучения.

¹ «Гидродинамическая теория смазки», Сборник работ, ГТТИ, 1934.

В 1859 г. Кирхгоф установил, что испускательная способность любого тела может быть сведена, если известна его поглощательная способность, к испускательной способности абсолютно чёрного тела, находящегося при той же температуре. Испускательная способность абсолютно черного тела является универсальной функцией температуры и длины волны. Перед теоретической физикой возникла задача — определить вид этой функции. Используя её независимость от структуры тела, можно было представить простую модель этого тела, например рассматривая его как совокупность осцилляторов, испускающих и поглощающих энергию, каждый своей определённой частоты. Однако до электромагнитной теории света эта задача не решалась, подход к её решению обеспечивался совокупным развитием электродинамики, термодинамики и статистической физики.

В 1879 г., т. е. через двадцать лет после опубликования Кирхгофом его закона (более детальное обоснование его было дано им в 1861 г.), Стефан (1835—1893), обрабатывая измерения французских физиков, установил, что полная лученспускательная способность чёрного тела пропорциональна четвёртой степени абсолютной температуры тела. Через пять лет, в 1884 г., Больцман обосновал закон Стефана теоретически, применяя к равновесному излучению законы термодинамики и принимая, что излучение в соответствии с электромагнитной теорией оказывает давление, равное, в случае полной изотропности его, одной трети плотности электромагнитной энергии. Вывод этот явился подлинным триумфом теоретической физики и, в частности, новой максвелловской электродинамики. Входящая в закон Стефана-Больцмана абсолютная температура была температурой того тела, с которым находится в равновесии данное излучение.

Следующий важный шаг, имеющий огромное принципиальное значение, был сделан русским физиком Голицыным. В 1892 г. в своей диссертации «Исследования по математической физике» он рассматривал проблему лучистой энергии (вторая часть работы). В этой работе, помимо вывода светового давления, содержится важный новый результат. А именно — Голицын рассматривает пространство, заполненное излучением, как некоторую материальную среду, к которой применимо понятие температуры. С точки зрения электромагнитной теории света, как указывает Голицын, «лучистая энергия, заключённая в единице объёма нашего цилиндра, должна обуславливаться совокупностью всех электромагнитных колебаний, лучеиспускаемых нашей абсолютно чёрной поверхностью, находящейся при некоторой абсолютной температуре T ».

Голицын считает, что каждое отдельное колебание целесообразно характеризовать частотой n . Тогда полное количество энергии, заключённой в единице объёма полости (в вакууме), может быть представлено в виде суммы

$$e = \text{const} \sum a_n^2,$$

где a_n — амплитуда соответствующего электромагнитного колебания частоты n . Эта величина зависит от температуры и частоты

$$a_n^2 = f(T, n);$$

следовательно,

$$e = \text{const} \sum f(T, n).$$

При непрерывном распределении энергии по частоте, эта сумма переходит в интеграл. Если мы обозначим $\varphi(n)dn$ — вероятность нахождения лучей в спектре, частота которых лежит между n и $n + dn$, то

$$e = \text{const.} \cdot \int_0^{n_m = \omega(T)} f(n, T) \varphi(n) dn;$$

так как e пропорционально T^4 , то получаем:

$$T^4 = \text{const.} \cdot \int_0^{n_m = \omega(T)} f(n, T) \varphi(n) dn.$$

«В этом выражении, — указывает Голицын, — величина, стоящая под знаком интеграла, имеет некоторый вполне определённый физический смысл: эта величина прямо пропорциональна квадрату соответствующего электрического смещения.

Мы приходим таким образом к результату, который можно сформулировать в виде следующего закона:

Абсолютная температура обуславливается совокупностью всех электрических смещений, и именно четвёртая степень абсолютной температуры прямо пропорциональна сумме квадратов всех электрических смещений (подчёркнуто Голицыным. В конце он делает сноску: «отнесённых к пустоте»).

Нельзя не признать, что Голицын близко подошёл к идеям будущей квантовой теории (фотонный газ Эйнштейна), и немудрено, что его мысли не были поняты современниками, в том числе таким выдающимся физиком, как А. Г. Столетов. Вокруг диссертации Голицына разгорелась полемика, осложнённая внешними обстоятельствами, в связи с чем она в дальнейшем утратила характер объективной научной дискуссии. Для обоих участников эта полемика была очень тяжёлой; на самом Столетове она отразилась губительно.

Однако вернёмся к истории вопроса о чёрном излучении. Вид универсальной функции Кирхгофа впервые попытался определить русский физик Владимир Александрович Михельсон. Его работы по этому вопросу были опубликованы в 1887—1890 гг.

Прекрасную характеристику первой работы В. А. Михельсона «Опыт теоретического объяснения распределения энергии в спектре твердого тела» (ЖРФХО, 1887 г.), проложившей путь к исследованию проблемы черного излучения, дал А. Г. Столетов.

«Здесь, — пишет Столетов, — автор смело пролагает путь к решению задачи в высшей степени важной и до того времени никем не затронутой (курсив мой. — П. К.).

Исходя из мысли, что непрерывность спектра может происходить только при совершенной неправильности или случайности атомных колебаний в испускающем теле¹, автор прилагает к своей задаче приёмы теории вероятностей. Вводя несколько простых и естественных гипотез относительно этих колебаний и указывая на законность применения к данному вопросу известного в кинетической теории газов «закона Максвелла», г. Михельсон получает чрез преобразование максвелловского выражения аналитическую формулу распределения атомных скоростей, а отсюда

¹ В этом месте в сноске Столетов указывает, что аналогичная идея была высказана в 1886 г. Гуи, который однако не дал «никаких указаний о распределении энергии в спектре».

далее — формулу для напряженности энергии волн данного периода, вызываемых телом в окружающем эфире. Формулы г. Михельсона имеют известную степень гибкости, так как содержат неизвестную функцию температуры; определение этой функции будет возможно только при наличии опытного материала, пока еще крайне недостаточного. Это обстоятельство делает теорию г. Михельсона тем более ценною. С другой стороны, даже и не предпреляя всегда означенной функции, оказывается возможным получить некоторые интересные следствия, которые хорошо согласуются с немногими имеющимися в литературе опытными данными. А именно г. Михельсон из своего общего выражения выводит два весьма простых закона: 1) $\vartheta \lambda_m^2 = \text{const}$ и 2) $\frac{I_m \lambda_m}{E} = \text{const}$, где ϑ — абсолютная температура тела, E — полная энергия испускания, λ_m — длина волны, соответствующая наиболее напряженной части спектра, I_m — величина этой последней напряженности в отдельности. Насколько можно было воспользоваться для контроля этих двух положений опытными данными, заключающимися в опубликованных болометрических исследованиях Лянглея (к сожалению, с тех пор до последнего времени не подвинутых далее), оба закона г. Михельсона удовлетворительно выдержали этот контроль.

Приняв, для определения своей неизвестной функции, Стефанов закон лучеиспускания, как единственный, до некоторой степени подтверждаемый опытом, г. Михельсон строит на основании своих главных положений кривую, выражающую распределение энергии в спектре черного тела. Вид этой кривой опять удовлетворительно согласуется с опытными данными Лянглея.

Далее, всякий непрерывный (или почти непрерывный) спектр, относительно его происхождения, можно считать аналогичным спектру черного тела, — каково бы ни было агрегатное состояние испускающего тела. Таким образом мы можем искать согласия с означенной теоретической кривой и для случая спектра солнца (отвлекаясь от фраунгоферовых линий); это и действительно оправдывается в неожиданной степени при том сопоставлении, какое делает автор между своим выводом и известной солнечной кривой Лянглея, освобожденную от эффектов поглощения в земной атмосфере.

Таким образом, несмотря на свой, так сказать, зачаточный характер, остроумное исследование г. Михельсона о спектре дает в высшей степени замечательные и ценные результаты¹.

Итак, Михельсон впервые применил статистику к атомным колебаниям излучающего тела, получил закон распределения энергии в спектре, дающий правильную качественную картину с максимумом энергии при определенной длине волны, установил смещение этого максимума с повышением температуры в сторону коротких волн (правда закон Михельсона $\lambda_m^2 T = \text{const}$ не точен), т. е. не только начал разработку трудной задачи, но и получил первые существенные результаты. Столетов указывает, что Михельсон ожидал новых, более полных экспериментальных данных для дальнейшего развития своей теории.

«Сделав такой эскиз теории, автор ее на основании печатных и письменных сообщений проф. Лянглея о предстоящем новом ряде его эксперимен-

¹ А. Г. Столетов, Отзыв о диссертации В. А. Михельсона «О нормальной скорости воспламенения гремучих газовых смесей» (Уч. записки ИМУ, вып. 14 1899, стр. 9—10).

тальных изысканий, полагал дать дальнейшее развитие своему труду только после того, как эти новые обещанные данные будут опубликованы и явится возможность, с одной стороны, установить те пункты теории, которые пока оставались неопределёнными или гипотетическими, с другой стороны, подвергнуть теоретические выводы более многостороннему и точному сличению с опытным материалом. Обещанные г. Лянглеем результаты не появились однако и по сие время (писано в 1894 г. — П. К.). В числе других работ, появившихся с 1887 г., до сих пор не находится данных, необходимых для дальнейшей разработки теории г. Михельсона, — так как болометрические работы Рубенса, Пашена и др. касаются почти исключительно спектров избирательных. Это обстоятельство и помешало автору придать первоначальному эскизу более прочную и законченную форму¹.

Как видно из этого свидетельства Столетова, Михельсон переписывался с Лянглеем по вопросу экспериментального исследования черного излучения, он хорошо понимал необходимость постоянного контакта экспериментаторов и теоретиков для успешного решения задачи. И, как мы увидим дальше из свидетельства Планка, именно этот контакт сыграл важнейшую роль в возникновении и укреплении новых теоретических принципов.

Но Михельсон привлек внимание не только экспериментаторов. Не ограничившись публикацией своей работы на русском языке, он опубликовал ее переводы в французском «Жернел де физик» и английском — «Философическ мэгэзин». На исследования Михельсона обратили внимание В. Вин и Д. Релей. Релей в своей статье «О характере полного температурного излучения», опубликованной в «Философическ мэгэзин» в 1889, считая гипотезы Михельсона недостаточно убедительными, признал его метод «совершенно правильным» (the method is perfectly sound). Релей также указывал на необходимость более полных экспериментальных данных для решения проблемы. В. Вин (1864—1927) в работе 1893 г. «Некоторая новая связь излучения черных тел со вторым принципом термодинамики» нашел, что искомая функция распределения энергии может быть представлена в виде

$$e_{\lambda} = \frac{F(\lambda, T)}{\lambda^5} = T^5 F(\lambda, T),$$

причем максимум этой функции с повышением температуры смещается в сторону коротких волн согласно «закону смещения Вина».

В своей речи 11 декабря 1911 г., произнесенной в связи с присуждением в 1910 г. Нобелевской премии «за его открытия, относящимся к законам теплового излучения», Вин излагает сущность своего вывода:

«... Я должен сказать, что имел счастье найти на поле общей термодинамической теории лучеиспускания не всю еще жатву собранной. Пользуясь известными физическими законами, я мог вывести общий закон теории лучеиспускания, который под названием закона смещения встретил признание у всех физиков»².

Указав на термодинамическое обоснование законов Кирхгофа и Стефана-Больцмана, Вин продолжает:

«Но этим следствия, которые можно было вывести из термодинамики, не были еще исчерпаны. Нужно было еще установить те изменения, которые

¹ Уч. записки ИМУ, вып. 14, 1899, стр. 10 — 11.

² Новые идеи в физике, Сб. шестой, «Природа теплоты», М., 1914, стр. 104.

испытывают отдельные, имеющиеся в данном излучении цвета, при изменении температуры. Вычисление этих изменений опять-таки основано на идеальном процессе: для этого идеального процесса приходится допустить существование абсолютно отражающих тел, но отражающих всю падающую на них лучистую энергию не правильно, а диффузно, такие тела можно назвать «абсолютно белыми». Если излучение, исходящее от черного тела, попадает в пространство, окруженное такими телами, оно в конце концов будет распространяться так, как будто бы лучеиспускали стенки этого же пространства, имея ту же температуру, что и черное тело. Если теперь прекратить сообщение между черным телом и нашим белым пространством, то мы получим явление, которого в действительности никогда нельзя воспроизвести: лучистая энергия будет непрерывно двигаться вперед и назад между отражающими стенками. Но в воображении мы можем продолжать наш опыт дальше. Представим себе, что, передвинув стенки, мы уменьшим объем нашего пространства, так что вся лучистая энергия сжата теперь в меньшем пространстве. Тогда как лучистая энергия, падая на стенки, производит на них известное давление, то при уменьшении объема придется затратить некоторую работу точно также, как при сжатии газа. Работа эта, вследствие незначительности светового давления, очень мала, но ее можно вычислить весьма точно, а это в данном случае самое главное. Затраченная работа на основании принципа сохранения энергии не может пропасть: она превращается в лучистую энергию, и таким образом плотность лучистой энергии в данном пространстве увеличивается, но это не единственное изменение, которому подверглась рассматриваемая лучистая энергия: когда световой луч отражается от движущегося зеркала, меняется определяемый числом колебаний цвет луча. Это изменение, согласно так называемому принципу Допплера, играет большую роль в астрофизике: спектральная линия, образуемая приближающимся к нам светилом, оказывается смещенной в сторону более коротких волн на величину, пропорциональную отношению скорости небесного тела к скорости света. То же самое происходит, когда световой луч отражается от движущегося зеркала, но в этом случае смещение вдвое больше. Мы, таким образом, в состоянии вполне вычислить изменение, которому подверглось излучение при передвижении стенок. Столь существенное для этих рассуждений световое давление было доказано экспериментально лишь гораздо позже, а именно, впервые *Лебедевым*. *Аррениус* воспользовался им для объяснения кометных хвостов. До этого световое давление было только следствием электромагнитной теории *Максвелла*. Мы вычислим теперь, с одной стороны, изменение плотности лучистой энергии от движения стенок, с другой стороны — изменение отдельных длин волн. Из этого воображаемого опыта можно вывести важное заключение: на основании второго закона термодинамики мы можем сделать вывод, что спектральное распределение лучистой энергии, измененное нами сжатием объема, ограниченного отражающими стенками, будет таким же, как если бы соответствующее увеличение плотности лучистой энергии было достигнуто повышением температуры: действительно, в противном случае мы могли бы при помощи цветофильтров вызвать в наших двух пространствах (черном и белом) неодинаковую плотность энергии и получить работу из тепла без всякой компенсации. А так как изменение отдельных длин волн при сжатии мы умеем вычислить, то мы можем также вывести, как изменяется спектральное распределение черного тела при изменении температуры. Не вдаваясь в дальнейшие подробности этого вычисления, я прямо сообщу результат: лучистая энергия определенной длины волны изменяется с температу-

рою так, что произведение из температуры на длину волны остается постоянным»¹.

В изложении Вина ясно видна связь термодинамики, теории Максвелла, учения о световом давлении в проблеме излучения. Вин опирался в своём выводе именно на эти результаты, что отличает его работу от работы Михельсона, введшего в свои рассуждения идеи атомистики. Однако задача раскрытия вида функции $F(\lambda, T)$ заставила и Вина, следуя примеру Михельсона, привлечь статистику. Вин находился в переписке с Михельсоном и в своем докладе на Парижском конгрессе подчеркнул его инициативу в теории излучения. В работе 1896 г. Вин уже опирается на статистику.

«Законом смещения исчерпываются все выводы, которые могут быть сделаны для теории излучения из чистой термодинамики. Все эти выводы были подтверждены опытом ...»². Здесь Вин имеет в виду в особенности экспериментальные кривые, полученные в 1895 г. Л ю м м е р о м и П р и н г с г е й м о м с моделью чёрного тела, сконструированной Люммером в виде излучающей полости.

«Каким образом интенсивность излучения распределена по отдельным длинам волн, об этом мы из термодинамики не можем получить никаких сведений. Для этого нужны рассуждения, ближе входящие в механизм процесса излучения ...»

«Я сам сделал первую попытку в этом направлении. Трудность применения теории вероятностей к теории излучения я пытался обойти, представляя себе излучение исходящим от газовых молекул, движущихся по законам вероятности. Вместо этого можно было бы предположить, что излучение возникает при ударе электронов о молекулы. В дальнейшем ходе рассуждения существенным является предположение, что такая частичка всегда испускает излучение определённой длины волны, зависящей от скорости её, и что распределение скоростей различных частиц подчиняется закону М а к с в е л л а. Если прибегнуть затем к помощи выведенных из термодинамики законов смещения, то получается закон излучения, который для большей области длин волн хорошо согласуется с опытом, а именно, для области, в которой произведение из температуры и длина волны не слишком велико.

Как бы ни была несовершенна эта первая попытка, она все-таки дала формулу, которая только для больших длин волн значительно отличается от истинной. Но так как наблюдения с несомненностью установили эти отклонения, то не подлежало никакому сомнению, что формула должна быть изменена»³.

Формула, найденная Вином, имеет вид

$$e_{\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5} e^{-\frac{c_2}{\lambda T}},$$

где c_1 и c_2 — две константы. Как указывает Вин, она давала хорошее согласие с опытом в области коротких волн и не годилась в длинноволновой части спектра. В 1900 г. Релей сделал попытку применить к излучению закон о равномерном распределении энергии по степеням свободы. Об этой попытке Вин рассказывает так:

¹ Новые идеи в физике, Сб. шестой, стр. 107—109.

² Там же, стр. 111.

³ Там же, стр. 111—113.

«Лорд Р е л е й первый подошел к этому вопросу с совершенно иной стороны: он попытался применить к вопросу о лучеиспускании один весьма общий закон статистической механики, а именно закон о равномерном распределении энергии между степенями свободы системы, находящейся в состоянии статистического равновесия ...

Излучение, находящееся в пустом пространстве, также можно представить так, что оно будет обладать определенным числом степеней свободы. Дело в том, что когда волны отражаются от стен туда и обратно, то возникают системы стоячих волн, помещающихся в промежутках между двумя стенками ... Отдельные возможные стоячие волны представляют и здесь соответствующие элементы происходящих явлений и соответствуют степеням свободы. Если каждой степени свободы сообщить приходящееся на ее долю количество энергии, то получится закон излучения Р е л е я, согласно которому испускание лучистой энергии определенной длины волны прямо пропорционально абсолютной температуре и обратно пропорционально четвёртой степени длины волны. Закон этот согласуется с данными опыта как раз там, где рассмотренный выше закон перестаёт быть справедливым, и поэтому его сначала считали законом с ограниченною справедливостью»¹.

Закон Релея

$$e_{\lambda} = \frac{CT}{\lambda^4},$$

где C — некоторая константа. Таким образом были две формулы: одна для коротковолновой части спектра (формула Вина), другая для длинноволновой (формула Релея). Задача состояла в том, чтобы «сшить» эти формулы. Её и решил Планк, но результаты решения оказались совершенно неожиданными. О том, как развивались события, узнаем из рассказа самого Планка.

«Благодаря измерениям, проведённым О. Люммером и Е. П р и н г с г е й м о м в физико-техническом институте для исследования теплового спектра, я обратил внимание на закон Кирхгофа, что в evacuated, ограниченном полностью отражающими стенками полом пространстве, содержащем совершенно произвольные испускающие и поглощающие тела, устанавливается с течением времени состояние, в котором все тела имеют одну и ту же температуру и излучение во всех его свойствах, в том числе и в его спектральном распределении энергии, не зависит от свойств тел, а единственно только от температуры. Это так называемое нормальное распределение энергии представляет собой, следовательно, нечто абсолютное, и так как поиски абсолютного мне всегда казались прекраснейшей исследовательской задачей, то я со всем рвением занялся разработкой проблемы. Прямым путём решения представлялось использование максвелловской электромагнитной теории света. Поэтому я представил себе полое пространство заполненным простыми линейными осцилляторами или резонаторами со слабым затуханием, с различными собственными периодами и ожидал, что получающийся вследствие взаимного излучения обмен энергией между осцилляторами приведёт с течением времени к стационарному состоянию, соответствующему кирхгофовскому нормальному распределению энергии. Плодом этого длинного ряда исследований, из которых некоторые могли быть сравнены с имеющимися наблюдениями, например измерениями затухания В. Б ь е р к н е с а, причём они оправдали ожидания, было установление общего соотношения между энергией осциллятора определённого

¹ Новые идеи в физике, Сб. шестой, стр. 113—114.



М. Планк

собственного периода и энергией излучения соответствующей спектральной области в окружающем поле при установившемся обмене энергиями. При этом получился замечательный результат, что это соотношение совершенно не зависит от константы затухания осциллятора — обстоятельство, которое мне было особенно отраднo и приятно потому, что тем самым вся проблема допускала существенное упрощение, так как вместо энергии излучения можно было подставить энергию осциллятора и тем самым, вместо усложнённой системы из многих степеней свободы, появилась простая система с одной единственной степенью свободы.

Разумеется, этот результат означал не более, как предварительный шаг к началу решения собственно проблемы, которая предстала теперь передо мной во всей своей жуткой высоте. Первый

опыт преодоления этой высоты не удался, ибо моя первоначальная молчаливая надежда, что излучение осциллятора будет каким-либо характерным образом отличаться от поглощаемого излучения, оказалась обманчивой. Осциллятор реагирует только на такие излучения, какие он также поглощает и не обнаруживается, по крайней мере ощутимым образом, по отношению к соседней спектральной области.

К тому же моё предположение, что осциллятор может оказывать одностороннее, следовательно, необратимое действие на энергию окружающего поля, вызвало энергичное возражение Больцмана, который со своим зрелым опытом в этих вопросах привёл доказательство, что по законам классической динамики любой из рассмотренных мною процессов может протекать также в точно противоположном направлении таким образом, что однажды испущенная осциллятором сферическая волна распространится извне к нему и, сжимаясь до размеров осциллятора, будет им поглощена, что даёт ему повод поглощающую далее энергию опять отдать в том же направлении, откуда она пришла. Такого рода сингулярные процессы, как односторонне направленные внутрь сферической волны, я, правда, теперь мог исключить введением особой гипотезы — гипотезы естественного излучения, которая в теории излучения играет ту же роль, как гипотеза молекулярного хаоса в кинетической теории газов, и эта гипотеза обеспечивала необратимость процессов излучения. Однако расчёты показывали всё отчётливее, что для понимания центрального пункта всего вопроса ещё отсутствует существенное связующее звено.

Тогда мне ничего не оставалось, как предпринять ещё раз атаку проблемы с противоположной стороны, со стороны термодинамики, на почве которой я и без того чувствовал себя надёжнее, чем дома. Действительно, здесь мои ранние опыты по второму закону теории тепла оказались полезными тем, что я сразу напал на мысль — привести в связь с энергией осциллятора не температуру, а его энтропию. С моими занятиями этой проблемы случалось как раз обратное тому, что я болезненно ощущал ранее: отсутствие интереса коллег к выбранному мною направлению исследования;

теперь же, как раз наоборот, моя работа оказалась полезной, как определённое облегчение. Именно в ту пору все выдающиеся физики обратились, как с экспериментальной, так и теоретической стороны, к проблеме распределения энергии в нормальном спектре. Однако все они искали в направлении представления интенсивности излучения в её зависимости от температуры, тогда как я подозревал более глубокую связь в зависимости энтропии от энергии. Так как значение энтропии тогда ещё не нашло подобного ему признания, то я нисколько не волновался за используемый мною метод и мог свободно и основательно проводить свои расчёты, не опасаясь вмешательства или опережения с чьей-либо стороны.

Так как для необратимости обмена энергии между осциллятором и возбуждённым им излучением имеет особое значение вторая производная его энтропии по его энергии, то я вычислил значение этой величины для случая, стоявшего тогда в центре всех интересов виновского распределения энергии, и нашёл замечательный результат, что для этого случая обратная величина такого значения, которую я здесь обозначил R , пропорциональна энергии. Эта связь так ошеломляюще проста, что я долгое время признавал её совершенно общей и трудился над её теоретическим обоснованием. Однако шаткость такого понимания скоро обнаружилась перед результатами новых измерений. Именно, в то время как для малых значений энергии, или для коротких волн, закон Вина отлично подтвердился также и впоследствии, для больших значений энергии, или для больших волн, установили сперва Л ю м м е р и П р и н г с г е й м заметное отклонение, а проведённые Р у б е н с о м и Ф. К у р л б а у м о м совершенные измерения с плавиковым шпатом и калийной солью обнаружили совершенно иное, однако опять-таки простое отношение, что величина R пропорциональна не энергии, а квадрату энергии при переходе к большим значениям энергии и длин волн.

Так прямыми опытами были установлены для функции две простые границы: для малых энергий пропорциональность (первой степени) энергии, для больших квадрату энергии. Понятно, что так же как любой принцип распределения энергии даёт определённое значение R , так и всякое выражение R приводит к определённому закону распределения энергии, и речь идёт теперь о том, чтобы найти такое выражение R , которое давало бы установленное измерениями распределение энергии. Но теперь ничего не было естественнее, как составить для общего случая величину R в виде суммы двух членов: одного первой степени, а другого второй степени энергии, так что для малых энергий будет решающим первый член, для больших — второй; вместе с тем была найдена новая формула излучения, которую я предложил на заседании Берлинского физического общества 19 октября 1900 г. и рекомендовал для исследования.

Утром следующего дня меня посетил мой коллега Р у б е н с и рассказал, что он по окончании заседания ещё в ту же ночь сравнивал мою формулу со своими данными измерений и везде нашёл удовлетворительное согласие. Также Л ю м м е р и П р и н г с г е й м, которые вначале полагали, что нашли отклонения, скоро отвели свои возражения, потому что, как сообщил мне устно Прингсгейм, выяснилось, что найденные отклонения были вызваны ошибками расчёта.

Последующими измерениями формула излучения также подтверждалась, а именно, тем точнее, чем к более тонким методам измерения переходили. Однако формула измерения, если предполагать её абсолютно точную истинность, была сама по себе только счастливо угаданным законом, имеющим только формальное значение. Поэтому в день, когда она была уста-

новлена, я занялся задачей придать ей действительный физический смысл, и этот вопрос привёл меня самого к рассмотрению связи между энтропией и вероятностью, следовательно, и к ходу мыслей Больцмана.

«Так как энтропия аддитивная, а вероятность мультипликативная величина, то я положил просто $S = k \log w$, где k — некоторая универсальная константа, и исследовал теперь вопрос, можно ли выражение w , которое получится, если для энтропии вставить значение, соответствующее найденному закону излучения, истолковать как некоторую вероятностную величину.

«В результате этого исследования¹ было установлено, что это действительно возможно и что при этом k представляет так называемую абсолютную газовую постоянную, однако не для грамм-молекулы, а для действительной молекулы...² Что же касается величины w , то оказалось, что для истолкования этой величины как вероятности необходимо ввести новую универсальную константу, которую я обозначил h , и так как она имеет размерность произведения энергии на время, назвал элементарным квантом действия. Тем самым теперь сущность энтропии как меры вероятностей в смысле Больцмана была установлена также и для излучения»³.

Так произошла эта революция в области физических воззрений, имевшая огромное значение для дальнейшего развития физики.

В рассказе Планка ясно видно, что его привела к правильной формуле проблема «сшивания» функции R , ведущей себя различным образом в области коротких и длинных волн. Речь шла именно о совмещении закона Вина с законом Релея. Но закон Релея, как оказалось впоследствии, не имеет частного, ограниченного характера. Если стоять на позициях классической теории, то закон Релея приобретает совершенно общее значение. «Все произведённые до сих пор попытки, — писал Планк, — получить на основании известных законов теории электронов формулу для лучиспускания, между которыми особенно замечательно по своей общности и точности исследование J. H. Jeans'a, привели к тому результату, что h бесконечно мало и что, следовательно, формула $\left(e_\lambda = \frac{ckT}{\lambda^4}\right)$ Rayleigh'a имеет общее значение»⁴.

Исследования Джинса, о которых упоминает здесь Планк, были проведены им в 1905 г. В результате этих исследований закон распределения Релея вошёл в историю науки под названием закона Релея-Джинса, именно потому что Джинсом было показано, что общность этого закона такого же ранга, как общность электронной теории и классической статики.

«Однако, — говорит Вин, — смотреть на него как на общий закон излучения всё-таки нельзя, ибо он прямо противоречит всякому опыту, так как согласно ему энергия должна была бы всё более скопляться в самых коротких длинах волн»⁵. Этот вывод известен в истории науки под названием «ультрафиолетовой катастрофы».

Таким образом, между областью длинных волн и областью быстрых колебаний в классической физике образовался зияющий провал, перекрыть который классическими средствами не удалось.

¹ Этот результат, содержащий введение конечных квантов энергии для осциллятора, был доложен 14. 12. 1900 опять физическому обществу в Берлине. Это было днём рождения квантовой теории (примечание М. Планка).

² Здесь опущено несущественное место о постоянной Больцмана. — П. К.

³ M. Planck, Wissenschaftliche Selbstbiographie, 1932, стр. 27.

⁴ М. Планк, Теоретическая физика, стр. 117.

⁵ Новые идеи в физике. Сборник шестой, стр. 114.

«Крушение всех попыток перекрыть провал не оставило скоро никакого сомнения в том, что квант действия играет в атомной физике фундаментальную роль и что с его появлением началась новая эпоха в физической науке» (Планк).

О наступлении этой новой эпохи говорили и другие доклады секции, хотя связь их с квантовыми представлениями, только что народившимися и далеко ещё не осознанными даже самим автором этих представлений, конечно, ещё не ощущалась. Здесь прежде всего следует остановиться на докладе Ридберга о спектрах. То, что спектральный язык является ключом к микромиру, это уже начали сознавать. «Эти исследования,— писал в 1900 г. по поводу спектральных исследований В. А. Михельсон,— может быть, со временем позволят поднять завесу над тайною строения молекул и первичных атомов лучеиспускающих веществ»¹.

Высокая разрешающая способность решёток Роуланда произвела подлинную революцию в спектроскопии. «С появлением работ Роуланда в 1882 г.,— отмечал виднейший спектроскопист Г. Кайзер,— в истории спектроскопических исследований начинается новая эра. Роуланду удалось изготовить оптические решётки, которые дают спектры таких размеров и такого совершенства, что точность измерения возросла примерно в сто раз ... Понятно, что в сравнении с той степенью точности, которой теперь оказалось возможным достигнуть, прежние измерения длины волн потеряли почти всякую ценность, и в науке назрела потребность исследовать сызнова, во всеоружии новых методов, спектры всех элементов ...

Кирхгоф и Бунзен, создавая спектральный анализ, имели в виду, как показывает самое название, новый метод химического анализа в течение первых десятилетий его применения носили почти исключительно такой характер. Но чрезвычайная точность новых измерений дала возможность сделать из этого метода новое применение, которое оказалось несравнимо более важным: я говорю об исследовании строения атомов, их внутренних сил и совершающихся в них процессов»².

Но язык спектров оказался очень сложным. Михельсон в своём очерке, приложенном к книге Локьера «Спектроскоп», цитирует высказывание спектроскописта Шейнера, относящееся к 1890 г.

«В настоящее время мы меньше понимаем истинное значение фраунгоферовых линий, чем, казалось, понимали десять лет тому назад». «Это произошло от того,— поясняет Михельсон,— что постепенное накопление новых фактов и чрезвычайное увеличение точности спектральных измерений всё более и более развёртывали перед нами необыкновенную сложность спектральных явлений»³.



Д. В. Релей

¹ Норман Локьер, Спектроскоп, М., 1901, стр. 196.

² Г. Кайзер, Современное развитие спектроскопии, М., 1910, стр. 24—26.

³ Н. Локьер, Спектроскоп, стр. 160—170.



А. А. Майкельсон

Найденные совокупности линейных спектров не поддавались анализу, оказалось чрезвычайно трудным «усмотреть какую-нибудь правильность в распределении линий в чистотинейных спектрах...

Единственной бросающейся в глаза особенностью является здесь то, что многие линии располагаются попарно, в виде двух очень близких линий (дублета) или же по три — в виде так называемых триплетов. В остальном же линии и указанные группы их на первый взгляд расположены совершенно неправильно. Так как спектральные линии подобно музыкальным звукам обусловлены колебаниями вполне определённых периодов, то между линиями долго старались найти подобные же простые числовые соотношения, какие существуют между гармоническими

звуками. Почти в каждом спектре можно найти немногие такие линии, которых числа колебаний имеют приблизительно простое отношение; всё же линии подвести под такие отношения никоим образом нельзя. Но Шустер доказал на основании теории вероятностей, что и все замеченные гармонические соотношения являются чисто случайными, т. е. что столько же подобных отношений должно было бы встретиться между многочисленными спектральными линиями и в том случае, если бы распределение линий было совершенно произвольное, не подчинялось никакой решительно системе. Изыскание гармонических соотношений пришлось оставить и искать закономерность распределения линий в другом направлении.

«В 1885 году Бальмер первый указал простую алгебраическую формулу, из которой числа колебаний всех 13 видимых и ультрафиолетовых линий водорода могут быть получены простой подстановкой в неё всех целых чисел, начиная от 3 и кончая 15. Позднее Деландр открыл ещё 5 водородных линий в спектре протуберанцев, и эти новые линии также хорошо изображаются формулою Бальмера. Таким образом, была найдена некоторая математическая связь между отдельными линиями водородного спектра. Хотя эта связь и поныне является совершенно необъяснённой с физической точки зрения, но всё же она заставляет предполагать существование какого-то нам ещё неизвестного закона и позволяет говорить о линиях водорода, как о принадлежащих к одному «ряду», к одной и той же «серии»¹ (курсив мой. — П. К.). Формула Бальмера имеет вид

$$\lambda = B \frac{n^2}{n^2 - 4} \quad n=3, 4, 5 \dots$$

Если ввести волновое число $\bar{\nu} = \frac{1}{\lambda}$, то она может быть написана в виде

$$\bar{\nu} = R \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{n^2} \right).$$

¹ Н. Локьер, Спектроскоп, стр. 192—193.

Пройдёт тринадцать лет, и Бор приоткроет завесу над «неизвестными законами», скрывающимися в этих формулах, они окажутся квантовыми законами. Пока же физики кропотливо работают над поисками эмпирических формул, объединяющих спектральные линии в серии.

«Этот первый успех заставил искать подобную же правильность в распределении линий других спектров. Этим в новейшее время особенно занимались в Германии Кайзер и Рунге и в Швеции Ридберг.

Они нашли множество «серий» в спектрах различных элементов, но ни в одном из них (кроме спектра водорода) все линии не могут быть причислены к одной и той же «серии». Большая часть изученных линейных спектров содержит по несколько «серий», и весьма часто далеко не все известные линии элемента могут быть отнесены к известным сериям¹.

Михельсон приводит замечание Кайзера:

«Между тем как для щелочных металлов (в сноске указывается: «равно как и для водорода и гелия») все известные линии могут быть размещены в сериях, это пока оказывается невозможным для других элементов»².

Сериальные законы Ридберга найдены им в 1889 г. Для трёх серий: главной, первой побочной и второй побочной, волновые числа линий, входящих в серии, могут быть представлены формулами

$$\bar{\nu} = A - \frac{R}{(m+p)^2} \quad m=2, 3, 4 \dots$$

$$\bar{\nu} = B - \frac{R}{(m+d)^2} \quad m=2, 3, 4 \dots$$

$$\bar{\nu} = B - \frac{R}{(m+s)^2} \quad m=3, 4, 5 \dots$$

Здесь R —константа приближённо одинаковая для всех серий и равная константе в серии Бальмера. В честь Ридберга она называется ныне «константой Ридберга». Её теоретический расчёт был дан Бором на основе квантовых постулатов. Почва для открытия этих постулатов к 1913 г. была подготовлена настолько, что Бор, по выражению академика Мандельштама, был «загнан в угол».

Может показаться, что вопрос о световом давлении стоял несколько особняком по отношению к серии докладов, посвящённых природе излучения. Однако это не так. Вспомним, что говорил Вин о термодинамике излучения. Но дело не только в этом. С современной точки зрения опыты Лебедева допускают совершенно новую и неожиданную интерпретацию.

Так, в 1923 г. С. И. Вавилов обратил внимание на то, что опыты Лебедева по существу были первым экспериментальным доказательством взаимосвязи массы и энергии.

В самом деле, если представить себе световой поток, падающий на поглощающую площадку в 1 кв. см, то давление света P , равное по измерениям Лебедева плотности электромагнитной энергии U , должно по второму закону механики равняться количеству движения, сообщаемому площадке в 1 секунду. Если положить, что каждый кубический сантиметр светового потока обладает массой ρ , то количество движения в единице объёма светового поля будет ρc , а всё количество движения, переносимое светом на 1 секунду за площадку, будет:

$$\rho c \cdot c = \rho c^2.$$

Отсюда:

$$\rho c^2 = U,$$

¹ Н. Локьер, Спектроскоп, стр. 194.

² Там же, стр. 195.

а это и есть соотношение между массой и энергией (в данном случае между объёмной плотностью энергии и массой света).

Квантовая теория даёт чрезвычайно простой вывод давления света. Если на площадку в 1 см^2 падает поток света, содержащий в каждом кубическом сантиметре N фотонов, каждый из которых обладает импульсом $p = \frac{h\nu}{c}$, то импульс, сообщаемый площадке в 1 секунду и равный механическому давлению, оказываемому светом на площадку, будет:

$$P = p \cdot Nc = \frac{h\nu}{c} \cdot Nc = Nh\nu = U.$$

Квантовая интерпретация давления света позволяет получать очень простой вывод эффекта Допплера. Допустим, что источник света представляет собой площадку в 1 кв. см. , излучающий энергию в одну сторону в направлении, перпендикулярном площадке. Если площадка излучает N квантов в секунду частоты ν , то интенсивность излучаемого ею света равна

$$J = Nh\nu.$$

Представим, что излучающая площадка движется в направлении излучаемого света со скоростью v , частота излучения меняется, а следовательно, меняется и интенсивность

$$J' = Nh\nu'.$$

Какова энергетическая причина этого изменения? Эту причину легко понять, если принять во внимание, что при движении излучающая площадка, так сказать, толкает посылаемый ею световой поток, преодолевая его давление. Это давление, по измерениям Лебедева (в предположении малости ϵ),

$$P' = U' = \frac{J'}{c}.$$

Работа, совершаемая при этом в секунду, равна $P'v$, и она-то и обеспечивает приращение энергии $J' - J$. Таким образом,

$$J' - J = P'v = \frac{J'}{c}v; \quad J' \left(1 - \frac{v}{c}\right) = J.$$

Откуда:

$$\nu' = \frac{\nu}{1 - \frac{v}{c}}.$$

Так история вскрыла тесную связь, казалось бы, различных докладов, стоявших на третьей секции конгресса.

Скорость света. Доклад К. Корню о скорости света сообщал об успехах в измерениях этой важнейшей физической константы. Измерения самого Корню, проведённые им в 1873 г., дали значение $298\,500 \text{ км/сек.}$, а в 1874 г. $303\,330 \text{ км/сек.}$ Корню пользовался усовершенствованным им методом зубчатого колеса Физо. Блестящий экспериментатор Альберт Майкельсон (1852—1931), усовершенствовав метод Фуко, получил значение $299\,954 \pm 50 \text{ км/сек.}$ Юнг и Форбс в 1881 г. по методу Физо получили $301\,382 \text{ км/сек.}$ При этом они наблюдали окрашивание зубца при появлении и исчезновении света. Явление это они истолковали как наличие дисперсии в вакууме. Это дало повод Релею (1842—1919) исследовать теоретически вопрос о том, какая собственно скорость измеряется во всех этих методах.

В 1876 г. Стокс в гидродинамике ввёл понятие о групповой скорости. Если рассматривать простейшую группу волн, образованную двумя системами плоских монохроматических волн с бесконечно близкими частотами, распространяющимися по одному направлению, то можно, следуя Стоксу, получить выражение для групповой скорости. В самом деле, если представить компоненты группы уравнением

$$y_1 = a \sin(k_1 x - \omega_1 t); \quad y_2 = a \sin(k_2 x - \omega_2 t),$$

то группа будет носить характер биений

$$y = y_1 + y_2 = 2a \cos\left(\frac{k_1 - k_2}{2} x - \frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t\right) \times \\ \times \sin\left(\frac{k_1 + k_2}{2} x - \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t\right),$$

или, введя обозначения:

$$k_1 - k_2 = \Delta k, \quad \omega_1 - \omega_2 = \Delta \omega, \quad \frac{k_1 + k_2}{2} = k, \quad \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} = \omega;$$

$$y = 2a \cos \frac{1}{2} (\Delta k \cdot x - \Delta \omega \cdot t) \sin(kx - \omega t) = A \sin(kx - \omega t).$$

Здесь амплитуда

$$A = 2a \cos \frac{1}{2} (\Delta k \cdot x - \Delta \omega \cdot t)$$

меняется в пространстве и во времени. Скорость перемещения максимума амплитуды $A_0 = 2a$ и есть групповая скорость. Она, очевидно, равна

$$u = \frac{x}{t} = \frac{\Delta \omega}{\Delta k},$$

или в пределе

$$u = \frac{d\omega}{dk},$$

тогда как фазовая или волновая скорость $v = \frac{\omega}{k}$.

Релей (1881) получил отсюда связь между групповой и фазовой скоростями:

$$u = v - \lambda \frac{dv}{d\lambda}.$$

Отсюда видно, что фазовая и групповая скорости совпадают только в отсутствии дисперсии, в случае же нормальной дисперсии $\left(\frac{dv}{d\lambda} > 0\right)$ групповая скорость меньше, а в случае аномальной $\left(\frac{dv}{d\lambda} < 0\right)$ — больше фазовой скорости.

Так как и в методе Физо и в методе Фуко цуг волн разбивается на отдельные отрезки, образующие группы, то очевидно, что в этих методах измеряется не фазовая, а групповая скорость. То же самое справедливо и в отношении метода Рёмера, в котором измеряется скорость движения отрезков, получающихся за время между двумя затмениями. Однако Релей полагал, что метод абберации позволяет измерять непосредственно фазовую, а не групповую скорость световых волн. Ошибка Релея была ис-

правлена П. С. Эренфестом, показавшим, что и в случае абберации измеряется групповая, а не фазовая скорость. Уточнение вопроса о скорости волн имело важное значение для последующего развития теоретической физики.

Измерения скорости света имели важное теоретическое значение. С одной стороны, эти измерения были одним из опорных пунктов электромагнитной теории света. В совпадении оптических измерений с чисто электрическими измерениями константы единиц Максвелл видел решающий (и в его время единственный) аргумент в пользу своей теории.

Но была и другая сторона, приведшая также к глубоким изменениям в физических воззрениях. Выше было сказано, что незадолго до своей смерти Максвелл написал письмо к редактору «Нейчур», опубли-

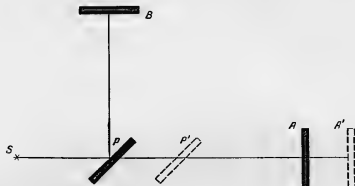


Рис. 157

кованное после его смерти в 1880 г., в котором указывал на возможность определения движения в эфире непосредственными измерениями, однако в земных условиях, требующих высокой, по мнению Максвелла—едва ли достижимой, точности. В 1881 г. Майкельсон проводил свой первый эксперимент по обнаружению «эфирного ветра». Майкельсон рассчитывал свой опыт следующим образом. Пусть свет, прошедший через пластинку интерферометра P , распространяется в направлении движения Земли до зеркала A . Пока свет пробегает расстояние $l = PA$, зеркало A уйдёт вперёд на некоторое расстояние $AA' = vt$, и, таким образом, полный путь, пробегаемый лучом от пластинки P до зеркала, будет равен

$$ct_1 = l + vt_1,$$

откуда:

$$t_1 = \frac{l}{c - v}.$$

При обратном движении света, наоборот, путь сокращается вследствие приближения пластинки P' , и время обратного движения определяется уравнением

$$ct'_1 = l - vt'_1; \quad t'_1 = \frac{l}{c + v}.$$

Отсюда полное время, затрачиваемое светом на движение от пластинки P до зеркала A туда и обратно,

$$T_1 = \frac{l}{c - v} + \frac{l}{c + v} = \frac{2l}{c} \cdot \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}}.$$

Что же касается луча, идущего к зеркалу B , то Майкельсон полагал, что на его движение «эфирный ветер» никакого влияния не оказывает, и поэтому время для движения луча от P к B и обратно то же самое, как и в случае полного покоя интерферометра:

$$T_2 = \frac{2l}{c}.$$

Следовательно, по мнению Майкельсона, нужно ожидать разницы во времени, равной

$$\Delta T = T_1 - T_2 = \frac{2l}{c} \left(\frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} - 1 \right) \approx \frac{2l}{c} \frac{v^2}{c^2}.$$

Чтобы обнаружить эту разницу, надо повернуть интерферометр на 90° , плечи интерферометра поменяются местами, вследствие чего разность ходов изменится на величину

$$\Delta z = \omega 2\Delta T = 4l \frac{v^2}{c^2},$$

а полосы сместятся на

$$\Delta b = \frac{\Delta z}{\lambda} = \frac{4l \frac{v^2}{c^2}}{\lambda}$$

в ширине полос. При $l = 1$ м, $v = 30 \frac{\text{км}}{\text{сек}}$,

$\lambda = 5 \cdot 10^{-7}$ м

$$\Delta b \approx 0,08$$

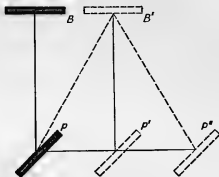


Рис. 158

полосы. Никакого смещения такой величины Майкельсон не обнаружил.

В 1884 г. Г. Лоренц указал, что в расчёт Майкельсона вкралась ошибка, увеличивающая ожидаемый эффект. Дело в том, что движение Земли должно сказаться и на времени движения второго луча (абберационный эффект). Правильный расчёт времени движения луча от пластинки P к зеркалу B и обратно должен строиться следующим образом. Пока луч идёт от P к B , зеркало передвинется в положение B' , пройдя путь $BB' = vt_2$. Поэтому свет должен пройти не путь PB , а путь

$$PB' = ct_2$$

и время движения света от пластинки P к зеркалу B определится уравнением

$$(t_2)^2 = l^2 + (vt_2)^2,$$

откуда:

$$t_2 = \frac{l}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{l}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Такое же время потребуется на обратное движение от B к P и поэтому полное время, затрачиваемое светом на движение от пластинки интерферометра к зеркалу B и обратно, будет равно

$$T_2 = \frac{2l}{c} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Теперь разность времён прохождения обоих лучей до встречи в трубе интерферометра будет равна:

$$\Delta T = T_1 - T_2 = \frac{2l}{c} \left[\frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right] = \frac{l}{c} \frac{v^2}{c^2}.$$

Соответствующая разность хода

$$\Delta z = c \cdot \Delta T = l \frac{v^2}{c^2}$$

и ожидаемое смещение полос при повороте на 90° в ширине полосы

$$\Delta b = 2 \frac{\Delta z}{\lambda} = 2 \frac{l}{\lambda} \frac{v^2}{c^2}$$

двое меньше первоначального расчёта Майкельсона (0,04 полосы).

Майкельсон повторил совместно с Морлеем свой эксперимент в 1887 г. Чтобы повысить точность метода, они путём многократных отражений увеличили длину l до 11 м, что позволило ожидать смещения в 0,4 полосы. Интерферометр был смонтирован на круглой каменной плите, плавающей без толчков и сотрясений в ртутной ванне. Этим обеспечивалась возможность плавного поворота прибора, требуемая условиями опыта. И, тем не менее, опыт не дал ожидаемого результата. Никакого регулярного смещения полос при повороте прибора обнаружено не было. Смещения носили случайный характер и не превышали 0,02 полосы, что лежало в пределах ошибок наблюдения.

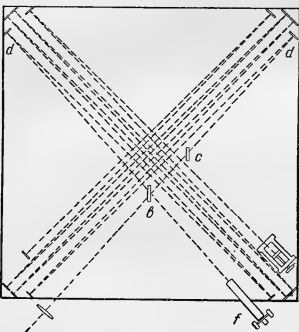


Рис. 159. Схема опыта Майкельсона

на основе более широкой постановки вопроса об электродинамике движущихся сред. Естественно, что и в нашем изложении истории физики мы должны были вернуться к опытам Майкельсона после изложения истории развития электродинамики Максвелла и электронной теории.

Итак, работы секции термодинамики и оптики затрагивали глубокие вопросы, касающиеся природы электромагнитного излучения, природы света. Следует отметить, что в тогдашней обстановке идея о дискретной природе излучения не могла возникнуть, хотя постоянная Планка уже появилась. Ещё в 1911 г. сам основатель теории квант Планк говорил, что взгляд, согласно которому «энергия электромагнитных волн или по край-

Отметим любопытное историческое обстоятельство, на которое почему-то мало обращалось внимания. Опыты Майкельсона были поставлены до опытов Герца. Физике предстояло «переварить» результаты открытия Герца, создать электронную теорию и вернуться к экспериментам Майкельсона

ней мере энергия колебаний электронов, являющаяся в то же время источником лучистой теплоты, имеет атомистическое строение», является «ещё слишком радикальным для того, чтобы исходить из него во всех случаях»¹.

Сам Планк предлагал следующий компромисс:

«По моему мнению, совершенно не будет противоречить гипотезе квант, если мы будем представлять себе, что в случае совершающего периодические колебания молекулярного осциллятора только испускание энергии происходит в виде квант, поглощение же по крайней мере в случае лучистой теплоты происходит, напротив, совершенно непрерывно»².

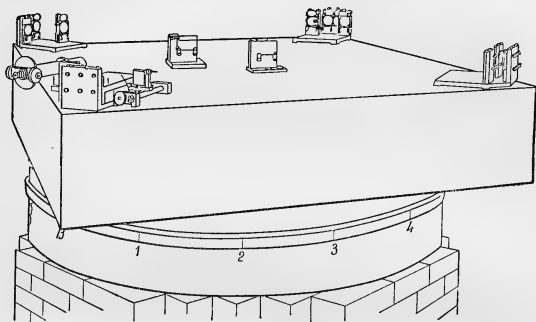


Рис. 160. Интерферометр Майкельсона

Если сам автор теории квант ещё не сознавал всей глубины и значительности вызванного им переворота в воззрениях на природу излучения, то о других современных ему физиках не приходится и говорить. Волновые представления считались единственно возможными, и с этой точки зрения дискутировались вопросы о природе света, в частности о природе белого света и о природе спектра. Со времён Ньютона считалось, что «солнечный свет состоит из лучей различной преломляемости», т. е. что монохроматические волны, на которые свет разлагается призмой или решёткой, содержатся в излученном колебании.

Френель установил факт, что интерференция может происходить только в том случае, если разность ходов интерферирующих пучков не превышает некоторой максимальной длины. Отсюда он заключил, что монохроматические колебания, излучаемые источником, на самом деле не являются таковыми, а состоят из серий правильных волн, нерегулярно следующих друг за другом. Исследуя максимальную разность хода, можно измерить длину такой правильной серии. Майкельсон нашёл, что она составляет 540 000 λ , Фабри и Пьеро повысили это число до 750 000 λ .

¹ М. Планк, Новейшие теории в термодинамике, СПб, 1913, стр. 34.

² Там же.

В 1886 г. Гуи в работе «О световом движении» впервые поставил под сомнение идею, что правильные или «квазиправильные» колебания содержатся в излучаемом импульсе. Излучаемый импульс является произвольной непериодической функцией времени и не содержит в себе периодических процессов. Спектральный аппарат перерабатывает этот импульс так, что «интенсивность света в произвольной точке оптической системы равняется сумме интенсивностей, которыми обладали бы в этой точке идеальные колебания, входящие в выражение

$$F(t) = \frac{1}{T} \sum_{n=1}^{n=\infty} r_n \sin\left(2\pi \frac{t}{\theta_n} + \beta_n\right),$$

если бы они действительно существовали и распространялись в данной оптической системе»¹.

Релей в той статье 1889 г., в которой он говорит о работе Михельсона и которую Столетов называет «замечательной», прямо объявляет идею о сложении белого света из регулярных импульсов бессмыслицей (nonsense). Эксперимент по определению максимальной разности хода, при которой ещё возможна интерференция, не даёт никакого основания для суждения о степени однородности посылаемых излучателем импульсов, они являются характеристикой разрешающей способности аппарата.

В работе 1894 г. А. Шустер развивает эти идеи Релея, выясняя механизм переработки спектральным аппаратом (решёткой или призмой) непериодического импульса в периодические колебания. Основная мысль меуара Шустера сформулирована им следующим образом:

«Когда мы говорим о «природе» света, мы пытаемся построить мысленную картину того, что представляет свет перед тем, как он попадает в спектроскопы и прочие оптические приборы, поэтому необходимо исследовать те изменения, которые свет претерпевает, проходя через наши приборы. Если, например, мы склонны смотреть на спектроскоп как на прибор, производящий анализ белого света, подобно тому как химик анализирует сложные вещества, разделяя их на составные части, мы придём к заключению, что в высшей степени однородные излучения, выходящие из спектроскопа, действительно содержатся в свете, поступающем в спектроскоп. Как показал ещё Релей, такое представление является ошибочным: сам спектроскоп превращает белый свет в однородные излучения. Выяснив себе действие оптических приборов на свет, мы должны обратиться к оптическому экрану, который воспринимает свет, к сетчатой оболочке глаза или фотографической пластинке. Мы ясно поймём, каким коренным образом наши восприятия зависят от особенностей этих приёмников, если попытаемся представить себе, какие глубокие изменения наших впечатлений о внешнем мире произошли бы, если бы наши глаза были одинаково чувствительны ко всем родам излучений, так что впечатление зависело бы только от интенсивности излучения. То, что относится к экспериментальному анализу света, относится также и к математическому: процесс математической обработки может оказать влияние на наши заключения»².

Эта дискуссия о природе белого света впоследствии была переосмыслена в связи с развитием радиофизики. Большую роль в уяснении сущ-

¹ Новые идеи в физике, Сборник пятый, «Природа света», М., 1914, стр. 24.

² А. Шустер, Введение в теоретическую оптику, СПб, стр. 334.

ности спектрального разложения сыграли работы акад. Л. И. Мандельштама и его школы.

Какие же проблемы электродинамики обсуждал Между-народный конгресс физиков в 1900 г.? На четвёртой секции были заслушаны доклады: Поинтинга — о теории распространения электричества, Абрагама — об определении величины c , Блондло и Гюттона — о скорости электрических волн, Риги — о герцовских волнах, Бранли — о радиоиндукторах (когерерах), Бутти — о газах как диэлектриках, Аррениуса — об электролизе и ионизации, Христиансена — об электричестве контакта, Люсьена Пуанкаре — о теории элемента, Дюбуа — о магнитных свойствах тел, Варбурга — о гистерезисе, Нагаока — о магнитострикции, Гирмуцеску — о действии намагничивания, Ланга — об электрической дуге, Потье — о многофазных токах, Блонделя — об осциллографах.

Как видно из перечня докладов, на секции обсуждались успехи, достигнутые в изучении электрических явлений к началу XX в. Видное место заняли проблемы максвелловской электродинамики (доклады Поинтинга, Абрагама, Блондло и Гюттона, Риги, Бранли), затем вопросы магнетизма (доклады Дюбуа, Варбурга, Нагаока, Гирмуцеску) и электротехники (доклады Ланга, Потье, Блонделя).

Мы уже подробно освещали эти вопросы в предыдущих главах, и нет смысла возвращаться к ним ещё раз. Ограничимся только некоторыми замечаниями об истории изобретения осциллографа — этого важнейшего прибора современной экспериментальной физики.

Открытия Герца и Попова, внедрение переменных токов в электротехнику поставили в порядок дня проблему изучения быстропеременных электрических колебаний. Первый шаг в этом направлении был сделан Феддерсеном, применившим вращающееся зеркало для наблюдения искрового разряда. Дальнейший шаг был сделан русским физиком Р. А. Колли, сконструировавшим в 1885 г. (предварительное сообщение было опубликовано в 1890 г.) первый осциллограф. Он построил его в связи с экспериментальной и теоретической разработкой электрических колебаний и, в частности, для задачи определения скорости света электрическим методом. Свой прибор Колли назвал осциллометром. Описание прибора он опубликовал в 1891 г. в статье «Снаряд для наблюдения электрических колебаний. К теории снаряда Румкорфа».

О теории индукционной катушки мы уже говорили в связи с работами Герца. Осциллометр Колли представлял собой электромагнитный гальванометр. В магнитное поле, создаваемое двумя катушками, помещался лёгкий магнит в виде пластинки, прикреплённой к задней стороне зеркала.

Зеркальце с магнитом укреплено на коконовой нити, натянутой вертикально между двумя пружинками. При пропускании переменного тока в обмотках катушек магнит испытывал переменный момент и зеркальце приходило в колебания. Развёртка движения осуществлялась с помощью вращающегося круга, поставленного перед корпусом системы, снабжённого на окружности небольшим отверстием для пропуска света. Зайчик наблюдался в отсчётную трубу.

Осциллограф Блонделя был изобретён им через два года после Колли (1893). Система Блонделя была магнитоэлектрической. В 1897 г. Браун предложил для электрических колебаний разрядную трубку — электрон-нолучевую трубку. Ещё в 1926 г. А. А. Эйхенвальд писал: «Способ Брауна

в технике не так употребляем, как осциллограф, потому что требует источника высокого напряжения, и вообще не так удобен». Однако именно электроннолучевая трубка оказалась незаменимым средством для изучения процессов. Русский физик Р. А. Колли был пионером этого направления физического эксперимента.

Атомная физика. На пятой секции конгресса были обсуждены проблемы атомной физики. Это было первое в истории науки обсуждение результатов исследований открытого наукой мира неисчерпаемого атома. Открытие внутриатомных явлений явилось важнейшим результатом работы физиков последней трети XIX столетия. Оно определило ведущее направление физических исследований следующего XX столетия и вызвало те глубокие изменения физического мышления, блестящий анализ которых дал В. И. Ленин в своей бессмертной книге «Материализм и эмпириокритицизм». Мы должны поэтому здесь более тщательно проследить историю возникновения атомной физики в конце XIX столетия, оставляя в стороне обсуждение философских выводов из факта открытия «неисчерпаемого атома». Здесь мы остановимся только на фактической истории атомной физики, не входя в обсуждение проблем философского характера.

На секции новые вопросы физики были представлены докладами: Г. А. Лорентца (1853—1928) о магнитооптических явлениях, А. Беккереля (1852—1908) об урановых лучах, П. Кюри (1859—1906) и Марии Склодовской-Кюри (1867—1934) о новых радиоактивных веществах, Биша и Свунгедана — об актиноэлектрических явлениях, Вилларда — о катодных лучах, Дж. Дж. Томсона (1856—1940) об электрических разрядах в газах и Виллари о ионизации газов.

Таким образом, круг вопросов, обсуждённых конгрессом, касался проблем, приведших к возникновению электронной физики, физики рентгеновских лучей и радиоактивности — первой главы физики ядерных процессов. Рассмотрим последовательно историю открытия электрона, рентгеновских лучей и радиоактивности.

Совершенно ясные идеи об атомном строении электричества были у В. Вебера, которые он развивал в ряде работ, начиная с 1862 г. В его сочинениях находим такие места:

**Открытие
электрона.**

«При всеобщем распространении электричества можно принять, что с каждым весомым атомом связан электрический атом» (Сочинения, т. IV, стр. 279). Он развивает в связи с этим воззрения на проводимость тока в металлах, которые отличаются от электронных только тем, что он считает подвижными атомы положительного электричества. Им высказана мысль о молекулярном истолковании тепла Джоуля-Ленца: «Живая сила всех содержащихся в проводнике молекулярных токов увеличивается при прохождении тока пропорционально сопротивлению и пропорционально квадрату силы тока».

Эти и подобные им высказывания В. Вебера дали повод А. И. Бачинскому назвать Вебера одним из творцов электронной теории, а О. Д. Хвольсону поместить его имя в начальном параграфе главы об электронной теории проводимости металлов. Отметим, однако, что Вебер ещё не связывает своего «электрического атома» с конкретными фактами электролиза. Эта связь впервые была установлена Максвеллом в § 260 т. I его «Трактата». Вот что мы читаем в этом параграфе:

«Назовём для краткости постоянный молекулярный заряд молекулой электричества. Это выражение, как бы оно ни было несовершенно и как бы мало оно ни гармонировало с остальным содержа-

нием этой книги, всё-таки поможет нам ясно высказать всё то, что мы знаем об электролизе.

Но Максвелл не стал развивать этой важной идеи. Наоборот, он утверждал, что идея молекулярного заряда не удержится в науке.

«Эта теория молекулярных зарядов может служить для выражения большего числа фактов электролиза; но мало вероятно, чтобы к тому времени, когда мы познаем истинную природу электролиза, мы сохраним хоть что-нибудь из теории молекулярных зарядов; тогда у нас будет твёрдая основа для того, чтобы создать истинную теорию электрического тока и освободиться от этих представлений».

Как мы теперь знаем, Максвелл ошибся в своём прогнозе. В этой ошибке повинно не только его увлечение «физикой эфира». Максвеллу казались слишком непреодолимыми трудности, стоящие перед электронной теорией проводимости. В своей посмертной книге «Электричество в элементарной обработке» он так пишет об этих трудностях:

«Мы знаем только, что такой-то заряд электричества в известное время перенесён от A к B , но, произошло ли это вследствие переноса положительного электричества от A к B или отрицательного от B к A , или вследствие некоторой комбинации обоих процессов, представляет для нас вопрос неразрешимый. Точно так же мы не можем определить, насколько велика или мала скорость электричества в проволоке. Если существует вещество, проникающее все тела, движение которого представляет электрический ток, то излишек этого вещества сравнительно с известным нормальным количеством и является величиной, поддающейся измерению. Но самый нормальный заряд мы не можем определить. Единственные данные, которыми мы обладаем, выведены из опытов над количеством электричества, выделенного при разложении грамма электролита; это количество громадно в сравнении с положительным и отрицательным зарядом, который можно сосредоточить в пространстве, занимаемом электролитом»¹.

Но, несмотря на эти трудности, идея атомного заряда продолжала развиваться. В 1874 г. ирландский физик Стоней в заседании Британской ассоциации обратил внимание на существование в природе трёх «естественных единиц»: скорости света, постоянной тяготения и заряда «электрического атома». По поводу этой последней единицы он сказал:

«Наконец природа одарила нас в явлениях электролиза вполне определённым количеством электричества, не зависимым от тел, с которыми оно связано». Стоней дал оценку этого заряда, разделив количество электричества, выделяемое при разложении кубического сантиметра водорода, на число его атомов по тогдашним данным, и получил значение порядка



В. Вебер

¹ Дж. К. Максвелл, Электричество в элементарной обработке, 1886, стр. 117—119.

10^{-20} электромагнитных единиц. Этот электрический атом Стоней предложил назвать «электроном».

5 апреля 1881 г. Гельмгольц выступил со своей известной фарадеевской речью. Приведём некоторые положения Гельмгольца, содержащиеся в этой речи:

«Теперь мы можем выразить закон Фарадея, сказав, что во всяком поперечном сечении электролитического проводника происходят всегда эквивалентные друг другу электрическое и химическое движения. Постоянно одно и то же определённое количество положительного или отрицательного электричества движется с каждым одновалентным ионом или с каждым эквивалентом многовалентного иона и неразлучно сопровождает его во всех передвижениях, совершаемых им в жидкости. Это количество мы можем назвать электрическим зарядом иона.

Я прошу заметить, что до сих пор мы говорили только о явлениях, которые можно наблюдать. Движение электричества может быть измерено для всего поперечного сечения каждого проводника и даже может быть определено для всякого неизмеримо малого элемента сечения внутри проводника при помощи вполне обоснованных теоретических соображений. То же самое можно сказать о переносе составных частей электролита. Эквиваленты химических элементов и соответствующие им электрические количества суть числа, которые дают вполне точные и легко наблюдаемые отношения. Что постоянное отношение химических соединений зависит от существования неделимых атомов—может показаться гипотезой; но в настоящее время мы не знаем никакой другой достаточно ясной и разработанной теории, которая была бы в состоянии объяснить все наблюдаемые в химии факты так просто и последовательно, как атомистическая теория современной химии.

Если применить эту гипотезу к электрическим процессам, то она в соединении с законом Фарадея приводит к поразительным следствиям. *Если мы допускаем существование химических атомов, то мы принуждены заключить отсюда далее, что также и электричество, как положительное, так и отрицательное, разделяется на определённые элементарные количества, которые играют роль атомов электричества*¹ (курсив мой. — П. К.).

Вскоре после речи Гельмгольца Стоней указал на свой приоритет в интерпретации закона электролиза. В 1891 г. он и независимо от него Рихард, опираясь на измерения Релея и братьев Кольрауш по электролизу, дали порядок величины атома электричества $1,3 \cdot 10^{-10}$ эл. ед.

Мы видим, что развитие теории электричества теснейшим образом связывается с развитием атомной теории.

Дальнейшая история электрона связана с изучением катодных лучей. В 1869 г. Гитторф, получив в разрядной трубке вакуум со степенью разрежения ниже 1 мм, заметил, что тёмное катодное пространство быстро распространяется по всей трубке, вследствие чего стенки трубки начинают сильно флюоресцировать. Он подметил, что свечения трубки смешаются под действием магнита.

Через десять лет после наблюдений Гитторфа появились работы В. Крукса, сделавшего первое сообщение о катодных лучах 5 декабря 1878 г., а сводный обширный доклад на заседании Британской

¹ Гельмгольц, Популярные речи, ч. 1, изд. 2, СПб, 1898, стр. 124.

ассоциации в Шеффилде 22 августа 1879 г. Этот доклад под названием «Лучистая материя, или четвёртое агрегатное состояние» был переведён в том же году на немецкий язык.

Идея Крукса заключается в следующем. С увеличением степени разрежения возрастает и длина свободного пробега молекул. Когда она становится сравнимой с размерами сосуда, в котором находится откачиваемый газ, то этот газ нельзя уже считать находящимся в газообразном состоянии; он подчиняется иным законам, не совпадающим с законами газового состояния. Его состояние будет, так сказать, ультрагазообразным, и Крукс назвал его четвёртым агрегатным состоянием, а материю, находящуюся в этом состоянии, «лучистой материей». По предположениям Крукса частичка лучистой материи выбрасывается из электродов с огромной скоростью. Тёмное катодное пространство — это пространство, в котором свободно движутся отрицательные молекулы газа, летящие от катода и задерживаемые на его границе встречными положительными молекулами. Крукс установил следующие свойства «лучистой материи».

1. Лучистая материя всюду, где она появляется, вызывает сильную флюоресценцию.

2. Лучистая материя движется прямолинейно.

3. Падая на твёрдое тело, лучистая материя задерживается им, вследствие чего образуется тень («Мальтийский крест» Крукса).

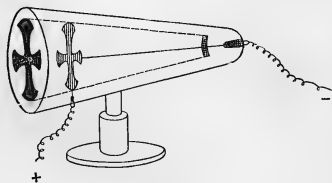


Рис. 161. Опыт Крукса

Крукс суммирует итоги своих экспериментов в таких выражениях: «Явления в этих разреженных трубках открывают перед физикой новый мир — мир, в котором материя существует в четвёртом состоянии, к которому применима корпускулярная теория света, в котором свет не всегда движется по прямой линии, мир, в который мы никогда не будем в состоянии войти и по отношению к которому мы должны удовлетворяться наблюдениями и опытами со стороны».



В. Крукс

4. Лучистая материя производит сильное механическое действие («Мельница Крукса»).

5. Лучистая материя отклоняется магнитом, параллельные потоки лучистой материи относятся друг к другу не как гальванические токи, а как одноимённо назлектризованные тела.

6. В местах, на которые падает лучистая материя, она производит теплоту.

Однако немецкие физики не приняли точку зрения Крукса. Э. Гольдштейн в 1880 г. показал, что отождествление размеров тёмного катодного пространства с длиной свободного пробега неправильно; при давлении $\frac{1}{125}$ мм Hg длина свободного пробега 5,7 мм, толщина тёмного слоя при этом порядка 57 мм, а флюоресцирующая пластинка светилась даже на расстоянии 90 см. Он показал далее, что катодные лучи вовсе не заканчиваются на границе тёмного слоя, они при больших разрежениях пронизывают и светящееся пространство анода.

Австрийский учёный В. Ф. Гинтль в том же году высказал гипотезу, что катодные лучи представляют собой поток металлических частиц, вырываемых из катода электрическим током, которые движутся прямолинейно. Эту точку зрения поддержал и развил далее Пулуа. В том же 1880 г. Э. Видеман отождествил катодные лучи с эфирными колебаниями столь короткой длины волны, что они не производят светового действия; однако, падая на весомую материю, они замедляются и превращаются в видимый свет.

Решающее значение в укреплении эфирной волновой теории катодных лучей сыграли опыты Ленарда. Ещё в 1883 г. Герц на основании ряда опытов пришёл к убеждению, что катодные лучи — это продольные короткие колебания. Эти опыты продолжил в 1893 г. Ленард. Он произвёл эксперимент с «ленардовым окошечком» из алюминиевой фольги, через которое он выпустил наружу катодные лучи. То, что катодные лучи могут проходить через тонкие слои металла, наблюдал ещё Герц, и это явилось для него веским аргументом против корпускулярной теории Крукса.

Ленард убедительно доказал, что катодные лучи могут выйти наружу при сохранении вакуума в трубке, т. е. эти лучи не могут быть частичками газа, как предполагал Крукс. Но этого мало. Катодные лучи в воздухе производят люминисцирующее и фотографическое действие. Ленарду удалось получить в выпущенном им потоке фотографию предмета, закрытого герметически алюминиевой коробочкой с тонкими стенками. Наблюдая отклонение выпущенного пучка магнитом, он установил, что это отклонение не зависит от рода газа, а главное — что остаётся часть лучей, не отклонённых магнитом.

Мы теперь знаем, что эти ленаардовы лучи являются рентгеновскими лучами (окошечко Ленарда — это антикатод рентгеновской трубки), и Ленард был первым физиком, наблюдавшим действие рентгеновских лучей и даже получившим первую рентгенограмму. Но он не сумел понять в должной мере своего открытия и характеризовал его как доказательство волновой природы катодных лучей.

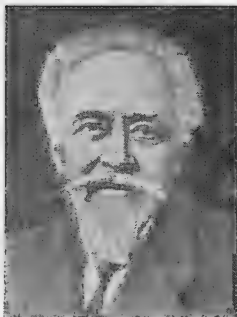
Заметим, что если бы Ленард работал с фотоэлектрическим катодом, как это он делал позднее, и осуществил бы надлежащую фокусировку катодного пучка, он мог бы наблюдать и первую картину дифракции электронов. Его эксперимент таил в себе большие возможности. Однако Ленард не использовал этих возможностей.

Когда после открытия Рентгеном его лучей (о чём мы будем говорить ниже) некоторые немецкие учёные (в том числе и сам Ленард) стали настаивать на приоритете Ленарда в этом открытии, то действительное положение вещей очень хорошо выразил престарелый Стокс в частной дискуссии по этому вопросу «Ленард имел, быть может, рентгеновы лучи в своём собственном мозгу, но Рентген первый направил их в кости других людей».

Теория Видемана-Герца-Ленарда была сильно поколеблена в 1895 г. опытом Перрена (1870—1942), который попытался обнаружить за-

ряд катодных лучей. С этой целью он в разрядной трубке поместил против катода фарадеевский цилиндр, соединённый с электрометром. При прохождении разряда цилиндр зарядился отрицательно. Отсюда Перрен сделал вывод, что «перенос отрицательных зарядов неотделим от катодных лучей».

Далее он поставил качественный эксперимент по электрическому отклонению катодных лучей. В его разрядной трубке анод имел форму сетки, тень от сетки отбрасывалась катодными лучами на задней стенке трубки. На пути между сеткой — анодом и стенкой помещалась металлическая проволока A , которая соединялась с одним из полюсов электростатической машины, тогда как другой полюс этой машины соединялся с анодом. Если машина выключена, то на стенке получалось свечение с теневым изображением сетки. Если машина работала и проволока A была соединена с её отрицательным полюсом, то свечение расходилось в стороны от проволоки; если же проволока была заряжена положительно, то лучи, наоборот, сходились за проволокой. Таким образом, Перрен с несомненностью установил перенос заряда катодными лучами и полагал, что этот факт трудно совместить с теорией вибраций, тогда как с теорией истечения он согласуется очень хорошо. Поэтому



Ж. Перрен

он полагал, что «если теория истечения может опровергнуть все возражения, которые она вызвала, она должна быть признана действительно пригодной».

Однако для того чтобы опровергнуть все возражения, необходимо было коренным образом изменить взгляды на строение материи и допустить в природе существование частиц меньших атомов. О том, как произошли эти изменения, приведшие к открытию электрона, рассказывает в своих воспоминаниях автор открытия Дж. Дж. Томсон.

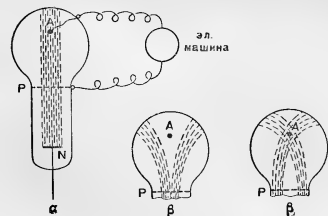


Рис. 161а.

«Исследования, которые привели к открытию электрона, начались с попытки объяснения расхождения между поведением катодных лучей в магнитном и электрическом полях. Магнитные силы отклоняют луч точно таким же образом, как они отклоняют отрицательно заряженные частицы, движущиеся в направлении лучей».

Фарадеевский цилиндр, помещённый вне нормальной траектории тонкого пучка катодных лучей, не получает какого-либо электрического за-



Дж. Дж. Томсон

ряда; однако он получает значительный отрицательный заряд, если пучок отклонён магнитом по направлению к цилиндру. Это должно казаться убедительным доказательством того, что лучи несут отрицательный электрический заряд; однако Герц нашёл, что лучи не отклоняются, когда они подвергаются действию электрического поля. Отсюда он пришёл к убеждению, что они не являются заряжёнными частичками. Он принял гипотезу, которой держались большинство немецких физиков, что это гибкие электрические токи, текущие сквозь эфир таким образом, что отрицательное электричество течёт от катода, положительное — по направлению к аноду и что они подвергаются действию магнитных сил в соответствии с законом Ампера. Такие токи будут сообщать отрицательный заряд телу, на которое они падают. Они должны отклоняться магнитом в соответствии с законом Ампера, но не

будут отклоняться электрическими силами. Это как раз и есть те свойства, которыми, как думали долгое время, обладают катодные лучи.

Но с этим находится в резком противоречии то, что наблюдал в 1880 г. Гольдштейн, работавший неутомимо более тридцати лет над катодными лучами и сделавший в этой области много важных открытий. Наблюждённый им эффект мы должны теперь рассматривать как действие электрической силы на лучи. Он пользовался трубкой, имевший два помещённых рядом катода, и наблюдал, что действие катодных лучей при одном катоде отклонялось от действия при одновременном включении обоих катодов. Отклонение было того направления, которое указывало на отталкивание обоих пучков.

Моя первая попытка отклонить пучок катодных лучей состояла в пропускании его между двумя металлическими пластинками, закреплёнными внутри разрядной трубки, и в создании электрического поля между пластинами. Таким путём не удавалось получить какого-либо постоянного отклонения. Однако я смог обнаружить слабое колебание в пучке в первый момент включения электрической силы. Это дало ключ к тому, что, я думаю, является объяснением отсутствия электрического отклонения лучей. Если между пластинами имеется какой-либо газ, то он будет ионизоваться при прохождении через него катодных лучей, чем будут созданы запасы положительно и отрицательно заряжённых частиц. Положительно заряжён-

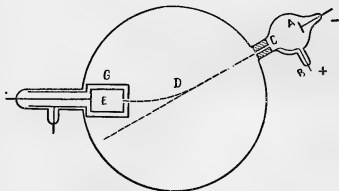


Рис. 162. Опыт Перрена

ная пластина будет притягивать к себе отрицательно заряженные частицы, которые нейтрализуются, в пространстве между пластинами останется положительная электризация. Аналогичным эффектом на отрицательно заряженной пластине будет её нейтрализация притягиваемыми ею положительно заряженными частицами. Таким образом, несмотря на заряде пластин, электрическая сила в пространстве между ними отсутствует; мгновенное колебание было как раз в момент, когда ещё нейтрализация не была достигнута¹. Отсутствие отклонения с этой точки зрения обусловлено наличием газа — существующее давление слишком высоко; следовательно, существенно важно получить более высокий вакуум. Это было легче сказать, чем сделать.

Техника получения высокого вакуума находилась тогда в весьма элементарной стадии. Нельзя было обеспечить удаление газа, конденсированного на стенках разрядной трубки и абсорбированного металлом электродов. При прохождении через трубку разряда этот газ высвобождался, вакуум быстро вырожда́лся и существовавшие тогда насосы не обла-

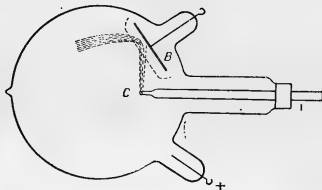


Рис. 163

дали достаточной скоростью откачки, чтобы препятствовать этому вырождению. Но после непрерывного разряда через трубку день за днём без введения свежего газа, газ отгонялся на стенки и электроды, и это дало возможность получить лучший вакуум. Отклонение катодных лучей в электрическом поле стало вполне заметным, и направление отклонения показало, что частицы, образующие катодные лучи, наэлектризованы отрицательно.

Этим результатом было устранено расхождение в действиях магнитных и электрических сил на катодные частицы; более того, был дан метод измерения скорости этих частиц v , а также отношения $\frac{e}{m}$, где m — масса частицы, e — её электрический заряд.

Механическая сила, производимая на частицу силой X , равна Xe и направлена по силе X ; механическая сила, оказываемая на движущуюся частицу магнитной силой H , не совпадает по направлению с H , но перпендикулярна к ней, а также к скорости частицы. Если магнитная сила перпендикулярна направлению движения частицы, то механическая сила равна Hev . Если приложенная электрическая сила X перпендикулярна как к скорости частицы, так и к магнитной силе, то механические силы, производимые электрической и магнитной силами, действуют вдоль одной прямой и подбором X и H можно добиться уравнивания производимых ими механических сил; в этом случае частицы, покинувшие катод, отклоняться не

¹ В «Корпускулярной теории вещества» Томсон описывает этот процесс таким образом: «катодные лучи, проходя через газ, делают его проводником электричества; таким образом, если в сосуде, через который проходят лучи, осталось заметное количество газа, то последний становится проводником электричества; лучи оказываются, таким образом, окруженными проводником, который защищает их от внешних электрических сил подобно тому, как металлическая крышка электроскопа защищает его от всякого электрического воздействия извне».

будут. Тогда $Xe = Hev$, отсюда $v = \frac{X}{H}$. Так как мы легко можем измерить X и H , то тем самым получаем простой метод определения v . Коль скоро нами получено значение v , мы можем получить значение m/e под действием магнитной силы, приложенной в надлежащем направлении; тонкий пучок катодных лучей изгибается по окружности радиуса $\frac{mv}{He}$, что может быть измерено, а следовательно, из одного магнитного отклонения будет определено отношение $\frac{mv}{e}$. Это было сделано Шустером за 10 лет до моих опытов. Однако одно магнитное отклонение не даёт возможности определить порознь

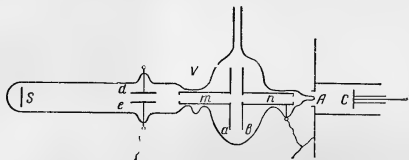


Рис. 164

v и m/e . Шустер предположил, что катодные частицы, прежде чем достигнуть места, где наблюдается отклонение, испытают так много столкновений с частицами газа, через который они проходят, что придут в состояние статистического равновесия с окружающим газом, получая ту же энергию, что и молекулы газа при температуре разрядной трубки. При таком предположении он пришёл к заключению, что масса катодных частиц будет того же порядка, что и масса молекул газа, через который они проходят. Гипотеза Шустера и его аргументация вполне обоснованы, если катодные частицы являются атомами или молекулами газа, и когда он нашёл, что при этом предположении магнитное отклонение согласуется с наблюдениями, то это сделало очень сильным доказательство предположения, что катодные частицы суть заряженные атомы.

Я же не мог усмотреть, как можно согласовать резкое очертание тонкого пучка катодных лучей с идеей, что катодные частицы испытывают достаточное число столкновений для того, чтобы прийти в статистическое равновесие с окружающим газом, и это указало мне на необходимость прямого измерения или энергии или скорости частиц. Я начал с измерения их энергии, заставляя пучок лучей падать на отверстие фарадеевского цилиндра, соединённого с электрометром. Внутри цилиндра был термостолбик, который частицы нагревали, ударяясь о него. Температура, до которой нагревался термостолбик за данное время, определялась, и если теплоёмкость цилиндра с его содержимым была известна, то отсюда могла быть определена энергия, сообщаемая лучами в единицу времени. Если n — число катодных единиц, ударяющихся в секунду о термостолбик, m — масса, e — электрический заряд и v — скорость частицы, то энергия E , сообщаемая термостолбику в секунду, даётся уравнением $E = \frac{1}{2} n m v^2$; Q — за-

ряд, определяемый электрометром, будет $Q = ne$; из магнитного отклонения получаем $T = \frac{e}{mv}$. Из всех этих уравнений находим уравнение

$$\frac{e}{m} = \frac{2ET^2}{Q},$$

дающее значение e/m через измеримые величины. Другой применённый мной метод заключался в уравнивании отклонения, производимого магнитной силой H , отклонением, проводимым электрической силой X . Тогда $v = \frac{X}{H}$, откуда получается другое выражение для e/m :

$$\frac{e}{m} = \frac{TX}{H}.$$

Используя тот или другой из этих методов, я определял значение e/m для разных газов, заполняющих трубку: воздуха, водорода, углекислоты, и

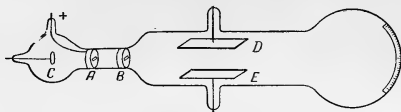


Рис. 165

нашёл, что это значение было одним и тем же для каждого из этих газов; среднее значение 26 измерений было $2,3 \cdot 10^7$. Значение v варьировалось в разных экспериментах от $2,3 \cdot 10^9$ до $1,2 \cdot 10^{10}$.

Эти эксперименты были исследовательского характера; аппаратура была простая и не предназначалась для получения более точных числовых результатов. Я был, однако, удовлетворён результатом, что e/m для частиц катодных лучей было порядка 10^7 , тогда как наибольшее, найденное для этого отклонения, значение было 10^4 для атома водорода в электролизе. Следовательно, если e — тот же самый заряд электричества, какой несёт атом водорода, как это позднее было действительно доказано, то m — масса частиц катодных лучей — должна быть не более, чем одна тысячная массы атома водорода наименьшей известной до того массы. Опытами было также доказано, что масса этих частиц не зависит от рода газа в разрядной трубке.

Этот результат был столь неожиданным, что оказалось более важным сделать общий обзор предмета, прежде чем попытаться улучшить определение точного отношения массы частицы к массе атома водорода.

Было найдено, что когда алюминиевые электроды, которые использовались в первом эксперименте, были заменены платиновыми или из других металлов, то это не оказало никакого влияния на значение e/m , никакого изменения не производило и изменение сорта стекла, из которого изготовлялась трубка.

Я испытал затем заряжённые частички, получаемые другими методами, при которых электрическая сила не прилагалась к их источнику. Было известно, что металлы, если их подвергать действию ультрафиолетового света, теряют отрицательный заряд и что то же самое происходит с раскалёнными металлическими и угольными нитями. Я измерял методами, основанными на простых принципах, которыми пользовался для катодных

лучей, значения e/m для носителей отрицательного электричества в этих случаях и нашёл, что оно имеет то же значение, как для катодных лучей.

После длительного обсуждения экспериментов оказалось, что мне не избежать следующих заключений:

1. Что атомы не неделимы, так как из них могут быть вырваны отрицательно заряжённые частицы под действием электрических сил, удара быстро движущихся частиц, ультрафиолетового света или тепла.

2. Что эти частицы все одинаковой массы, несут одинаковый заряд отрицательного электричества, от какого бы рода атомов они ни происходили, и являются компонентами всех атомов.

3. Масса этих частиц меньше, чем одна тысячная массы атома водорода.

Я вначале назвал эти частицы корпускулами, но они теперь называются более подходящим именем «электрон». Я сделал первое сообщение о существовании этих корпускул в пятницу на вечернем заседании Королевского института 29 апреля 1897 г.; извлечение из этого сообщения было опубликовано в *Electrician* 21 мая 1897 г. Более подробная публикация была сделана мной в *Philosophical Magazine* в октябре 1897 г.

Около того же времени были опубликованы Вихертом и Кауфманом другие исследования отношения m/e , в которых найденное значение довольно хорошо согласовалось с моими. Они, однако, не производили прямых измерений чего-либо, кроме магнитного отклонения катодных лучей. Оно даёт только $\frac{mv}{e}$; прямых измерений v или энергии $\frac{1}{2} mv^2$ в том месте, где они измеряли магнитное отклонение, они не производили, но, подобно Шустеру, оценивали энергию, сделав предположение о связи между энергией частиц в том месте, где измерялось магнитное отклонение, и энергией, которую эти частицы приобретают при прохождении разности потенциалов между электродами разрядной трубки.

Но если Шустер предполагал, что при столкновениях с молекулами газа катодная частица теряет практически всю энергию, приобретённую ею от электрического поля в трубке, то Вихерт и Кауфман предполагали, что она ничего не теряет из этой энергии.

Было невозможно оценить энергию, полученную заряжённой частицей от разности потенциалов между катодом и анодом в какой-либо точке её пути без лучшего знания механизма разряда, чем то, какое мы имели тогда, и даже то, каким мы располагаем в настоящее время. Нельзя даже определить пределы, между которыми заключается эта энергия. Так, например, стартовавшая от катода заряжённая частица должна ионизовать газ, через который она проходит, и производить новые заряжённые частицы. Эти последние должны по получении энергии от электрического поля производить другие заряжённые частицы, а те в свою очередь новые частицы. Эти вторичные частицы не могут приобрести столько энергии, сколько они имели бы, если бы стартовали от самого катода.

С другой стороны, если заряжённые частицы были освобождены из катода действием радиации, такой, как ультрафиолетовое излучение, или рентгеновских лучей очень короткой длины волны, какие известны в настоящее время в разрядных трубках, то эти частицы будут стартовать от катода с значительной энергией, и их энергия в каждой точке будет больше энергии, производимой электрическим полем. Если катодные частицы испускались катодом при ударе положительных ионов, они могут стартовать с энергией, полученной от этих частиц, а не от электрического поля. Измерения магнитного отношения дают только $vX\left(\frac{m}{e}\right)$. Чтобы определить зна-

чение m/e , необходимо измерить v , или некоторую комбинацию m/e и v иную, чем это произведение.

Развитая мной интерпретация моих результатов в корне отличалась от той, которую развивали немецкие физики. Кауфман (Widemannne Appallen, 61, p. 552) интерпретировал факт, что значение m/e не зависит от рода газа в трубке или от металла, использованного для катода, как доказательство того, что отрицательные частицы не получаются из какого-либо газа и металла. Я принял воззрение, что все атомы содержат эти малые частицы и что они выбиваются из атомов электрическими средствами, высокой температурой или рентгеновскими лучами. Сперва было очень мало тех, кто верил в существование таких телец, меньших атомов. Я впоследствии даже часто рассказывал о видном физике, который был тогда на моей лекции в Королевском институте, что он думал, что я их морочу («putting their Legs»). Я не был удивлен таким отношением, ибо сам приходил к этому истолкованию своих результатов с большой неохотой и то только после того, как убедился, что эксперимент не даёт возможности избежать предположения о существовании телец меньше атома. Были, однако, немногие — среди них я с благодарностью вспоминаю проф. Г. Фитцджеральда, — кто думал, что я сделал хорошее дело. Я продолжал свои эксперименты. Мною было определено e/m для носителей отрицательного электричества, испускаемого металлами, освещёнными ультрафиолетовым светом; оно было таким же, как и для катодных лучей. Я также нашёл, что оно правильно и для отрицательного электричества, испускаемого нагретыми металлами. Я определил также значение e/m электрического заряда, несомого этими отрицательно заряжёнными частицами, и нашёл, что оно было тем же самым, что и значение заряда, несомого водородным атомом при электролизе жидкостей. Это не оставило сомнения в том, что большое значение обусловлено уменьшением массы, а не увеличением заряда. Я сделал предварительное сообщение об этих результатах на собрании Британской ассоциации в Дувре в 1899 г., когда мой большой друг профессор Д. Г. Пойнтинг был секретарём секции А, и я полагаю, что завербовал много обращённых в новую веру¹.

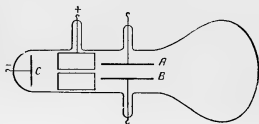


Рис. 166

Дополним живой и яркий рассказ Томсона некоторыми подробностями, уточняющими историю открытия электрона. Как мы видели, Томсону для доказательства универсальной природы этой вновь открытой материальной частицы, «корпускулы» по его терминологии, пришлось исследовать природу носителей электричества в фотоэффекте, термоэлектронной эмиссии и сделать попытку отдельного измерения заряда частиц. На всех этих исследованиях мы и остановимся подробнее.

Фотоэффект был открыт Герцем в 1887 г. при его опытах по генерированию высокочастотных электрических колебаний. Эффект, открытый Герцем, заключался в облегчении прохождения искрового разряда при облучении отрицательного полюса разрядника ультрафиолетовым светом. Гальвакс, Э. Видеман и Эберт продолжали исследования Герца «относительно действия лучей на электрические разряды высокого напряжения».

¹ J. J. Thomson, Recollections and Reflections, 1936, стр. 173.

А. Г. Столетов впервые поставил задачу «испытать, получится ли подобное действие при электричестве слабых потенциалов». Метод, которым А. Г. Столетов решал поставленную им задачу, привёл его к изобретению устройства, являющегося в принципе первым фотоэлементом. Первые опыты Столетова начались 20 февраля 1888 г. Они заключались в следующем (по описанию самого Столетова):

«Два металлических диска («арматура», «электроды») в 22 см диаметром были установлены вертикально и друг другу параллельно (рис. 167) перед электрическим фонарём Дюбоска, из которого вынуты все стёкла. В фонаре имелаась лампа с вольтовой дугой A (регулятор Фуко-Дюбоска), питаемая динамо-машиной (обыкновенно около 70 вольт и 12 амперов). Один из дисков, ближайший к фонарю, сделан из тонкой металлической сетки (встречаемой в продаже), латунной или железной, иногда гальванопластически покрытой другим металлом, которая была натянута в круглом кольце; другой диск — сплошной (металлическая пластинка).

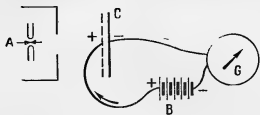


Рис. 167. Схема опыта Столетова по исследованию фотоэффекта

Диски соединены между собой проволокой, в которую введена гальваническая батарея B и чувствительный аstaticкий гальванометр Томсона G с большим сопротивлением (5212 омов), который наблюдался по английской методе (с лампой и скалой)»¹.

Такова эта классическая установка, которая с тех пор варьируется без изменения принципиальной схемы во всех фотоэлектрических измерениях и технических приложениях. Главную и существенную часть установки, как указывал сам Столетов, составляет «сетчатый конденсатор», являющийся прототипом современного фотоэлемента. Тщательные и всесторонние исследования с этим конденсатором привели Столетова к установлению важных выводов об излучаемом явлении, которые мы сформулируем его собственными словами. Эти результаты получены им для воздуха при обыкновенном давлении.

«1. Лучи вольтовой дуги, падая на поверхность отрицательно заряженного тела, уносят с него заряд (подчёркнуто мной. — П. К.). Смотри по тому, пополняется ли заряд и насколько быстро, это удаление заряда может сопровождаться заметным падением потенциала или нет.

2. Это действие лучей есть строго униполярное, положительный заряд лучами не уносится (подчёркнуто мной. — П. К.).

3. По всей вероятности кажущееся заряжение нейтральных тел объясняется той же причиной.

4. Разряжающим действием обладают — если не исключительно, то с громадным превосходством перед прочими — лучи самой высокой преломляемости, недостающие в солнечном спектре ($\lambda < 295 \cdot 10^{-6}$ мм). Чем спектр обильнее такими лучами, тем сильнее действие (подчёркнуто мной. — П. К.).

5. Для разряда лучами необходимо, чтобы лучи поглощались поверхностью тела (подчёркнуто мной. — П. К.). Чем больше поглощение активных лучей, тем поверхность чувствительнее к их разряжающему действию.

6. Такой чувствительностью без значительных различий обладают все металлы, но особенно высока она у некоторых красящих веществ (в анили-

¹ А. Г. Столетов, Собр. соч., т. I, стр. 218—219.

новых красках). Вода, хорошо пропускающая активные лучи, лишена чувствительности.

7. Разряжающее действие лучей обнаруживается *даже при весьма кратковременном освещении* (подчёркнуто мной. — П. К.), причём между моментом освещения и моментом соответственного разряда не протекает заметного времени.

8. Разряжающее действие, *ceteris paribus*¹, *пропорционально энергии активных лучей, падающих на разряжаемую поверхность* (подчёркнуто мной. — П. К.).

9. Действие обнаруживается даже при ничтожных отрицательных плотностях заряда²; величина его зависит от этой плотности: с возрастанием плотности до некоторого предела оно растёт быстрее, чем плотность, а затем медленнее и медленнее.

10. Две пластинки, разнородные в ряду Вольта, помещённые в воздухе, *представляют род гальванического элемента, коль скоро электроотрицательная пластина освещена активными лучами* (подчёркнуто мной. — П. К.).

11. Каков бы ни был механизм актино-электрического разряда, мы вправе рассматривать его как некоторый ток электричества, причём воздух (сам ли по себе или благодаря присутствию в нём посторонних частиц) играет роль дурного проводника. Кажущееся сопротивление этому току не подчиняется закону Ома, но в определённых условиях имеет определённую величину.

12. Актинно-электрическое действие усиливается с повышением температуры³.

Обратим внимание на то, как точно и ясно Столетов фиксирует характерные черты вновь открытой взаимосвязи между светом и электричеством. Электроны и кванты ему неизвестны, и объяснение нового эффекта является для него весьма трудной задачей. Но он правильно угадывает путь, по которому должно идти решение этой задачи. Прежде всего он указывает, что в фотоэлектрических разрядах «необходимую роль играет механическая *конвекция* (подчёркнуто Столетовым) электричества», что «на актино-электрические токи следует смотреть как на токи конвективные». При этом, поскольку дело идёт о газовом разряде при обычном давлении, мысль о конвективном характере этого разряда не является необычной, «но, — указывает Столетов, — мы ещё не поняли вполне, почему и как *начинается* (курсив Столетова) процесс. Почему те или другие частицы отделяются от поверхности электрода, почему действие униполярно, почему оно стимулируется лишь лучами известной категории и стоит в тесной связи с поглощением этих лучей поверхностью катода? Эти-то пункты и составляют главный нерв задачи»⁴ (курсив мой. — П. К.).

Столь ясная и чёткая постановка проблемы не оставляет сомнения в том, что Столетов нашёл бы её решение, если бы обстоятельства не оборвали сначала его исследований, а затем и самую жизнь. Существенно, что Столетов связывал решение проблемы с решением проблемы катодных лучей. Ему очень заманчивой казалась гипотеза Э. Видемана, что катодные

¹ При одинаковых условиях (лат.).

² Речь идёт о заряде пластин конденсатора, пропорциональном напряжённости электрического поля, т. е. разности потенциалов. Следовательно, в девятом пункте речь идёт по существу о характеристике фототока (зависимости силы тока от напряжения).

³ А. Г. Столетов, Собр. соч., т. I, стр. 260—261.

⁴ Там же, стр. 262.

лучи представляют собой эфирные колебания весьма малой длины волны, поскольку эта гипотеза шла в направлении той унификации света и электричества, которую провёл Максвелл и которая нашла только что своё блестящее подтверждение в открытии «электрических лучей» Герцем. Конечно, у Столетова был большой соблазн под впечатлением опытов Герца (которые ещё продолжались в период его занятий фотоэффектом) пуститься в спекуляции насчёт эфирной теории фотоэффекта, но он не поддался соблазну. «Мысль Видемана, повторяю, очень заманчива, но ей недостаёт надлежащего развития и *твёрдых фактических опор*, в особенности по отношению к разрядам слабого потенциала. С другой стороны, видеть в катодных эманациях просто эфирные волны во всяком случае преждевременно, пока не изучены ближе те движения весомых частиц, какие здесь несомненно происходят»¹ (курсив мой. — П. К.).

Столетов оказался прав. Прав он оказался и в сближении проблемы катодных лучей с проблемой фотоэффекта и в окончательном выводе: «изучение актино-электрических разрядов обещает пролить свет на процессы распространения электричества в газах вообще».

Следуя этому плану, Столетов продолжил свои исследования, изучив фотоэффект в разреженных газах. «Аппарат, который я построил для этого, — пишет Столетов, — состоял из цилиндрической коробки, из стекла, покрытого лаком (высотой 46 мм и с внешним диаметром 87 мм); коробка закрыта с одной стороны пластинкой кварца (диаметр 69 мм, толщина 5 мм), с другой — куском металла, в котором вращается микрометрический винт (шаг равен 0,36 мм) с разделённым барабаном. Посеребрённый латунный диск находится внутри коробки, он перемещается с помощью указанного винта; при движении диск остаётся параллельным самому себе и поверхности кварца, — он составляет отрицательную арматуру конденсатора. Внутренняя поверхность кварца посеребрена; на этой посеребрённой поверхности нанесены чёрточки наподобие дифракционной решётки (десять линий на миллиметр), — это положительная арматура».

О вакуумной установке Столетов сообщает такие сведения: «Коробка соединялась с насосом Шпренгеля, изменённым моим препаратом Усагиным так, что этот насос мог работать очень быстро и с малым количеством ртути. Насос был снабжён манометром Мак-Леода. Вследствие наличия запаянных частей и вследствие наличия винта в коробке разрежение можно было доводить только до 0,005 мм и только иногда до 0,002 мм (0,0000027 ат)»².

С этой установкой Столетов нашёл, что при уменьшении давления при прочих равных условиях ток сначала возрастает, достигая максимума при определённом давлении, названном им критическим, а затем убывает. Напряжение E , расстояние между обкладками конденсатора l и критическое давление p_m связаны между собой зависимостью

$$\frac{p_m l}{E} = \text{const.}$$

Эта константа получила в физике газового разряда название «константа Столетова».

Таковы результаты, полученные Столетовым и вошедшие в золотой фонд науки. Следует пожалеть, что неблагоприятные обстоятельства тогдашней жизни русских университетов не позволили Столетову продол-

¹ А. Г. Столетов, Собр. соч., т. I, стр. 265.

² Там же, стр. 210.

жить свои классические исследования. Но он хорошо понимал значение и важность этих работ и перед своей безвременной кончиной, случившейся в мае 1896 г., настойчиво советовал своему преемнику П. Н. Лебедеву заниматься физикой газового разряда, указывая что это очень важно.

Как и для катодных лучей, понимание природы явления фотоэффекта затруднялось отсутствием хорошего вакуума. Исследования, проведённые в 1899 г. Дж. Дж. Томсоном и Ф. Ленардом (1900) в условиях наиболее совершенного (по тем временам) вакуума показали, что сущность фотоэффекта заключается в испускании освещаемым катодом электронов.

Опыт, которым Дж. Дж. Томсон определил $\frac{e}{m}$ фотоэлектронов, заключался в следующем.

В приёмнике, с достаточно высоким вакуумом, помещался металлический стержень L , заканчивающийся маленьким цинковым диском AB (рис. 168). Металлическая сетка CD , соединённая с электрометром, служит второй (положительной) обкладкой конденсатора, тогда как диск AB является катодом. Расстояние между AB и CD можно менять, вдвигая и выдвигая стержень L . Приёмник закрыт кварцевым диском EF , через который установка освещается ультрафиолетовым светом. Наблюдая потерю заряда электрометром при освещении установки, указывающую на наличие фототока, включают магнитное поле, силовые линии которого параллельны пластинам конденсатора; тогда при некотором расстоянии между AB и CD фототок прекращается.

Если выбрать ось x параллельно электрическому полю конденсатора, а ось y параллельно пластинам конденсатора и перпендикулярно магнитным силовым линиям, то уравнения движения фотоэлектронов будут:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = Ee - He \frac{dy}{dt}; \quad m \frac{d^2 y}{dt^2} = He \frac{dx}{dt}.$$

Интегрируя эти уравнения при соответствующих начальных условиях, получим уравнения движения электронов по циклоиде:

$$x = a(1 - \cos bt), \quad y = a(bt - \sin bt),$$

где $a = \frac{Em}{He}$, $b = H \frac{e}{m}$.

Радиус образующего круга циклоида равен a , и поэтому наибольшее расстояние, на которое может удалиться электрон от катода,

$$x_m = \frac{2Em}{He}.$$

Отсюда может быть определено отношение $\frac{e}{m}$.

Переходим теперь к термоэлектронным явлениям.

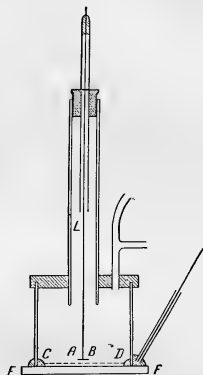


Рис. 168.
Опыт Дж. Дж. Томсона

В 1884 г. Эдисон, впаяв в лампу накаливания с угольной нитью металлическую пластину, заметил наличие тока в гальванометре, включённом в цепь, соединяющую пластину с положительным концом источника, накаляющего нить лампы. Флеминг (1890), включив в цепь пластины батареи, установил униполярность эффекта.

Наконец, Дж. Дж. Томсон установил природу частиц, вылетающих из раскалённого катода, измерив $\frac{e}{m}$.

В. Ф. Миткевич в 1903 г. показал, что в электрической дуге раскалённый катод испускает электроны, играющие важную роль во всём явлении. Миткевич измерил отношение $\frac{e}{m}$ для частиц, испускаемых катодом дуги, простым и остроумным методом.

Электроды дуги в экспериментах Миткевича были уголь (катод) и ртуть (анод). Если катод испускает в секунду N электронов, то сила тока $I = Ne$. Эти электроны несут с собой кинетическую энергию $N\frac{mv^2}{2}$, которую они получили в электрическом поле дуги:

$$IV = N\frac{mv^2}{2}.$$

Ударяясь о поверхность ртутного анода, эти электроны производят давление, в результате которого на поверхности ртути образуется углубление. Величина давящей силы определяется по закону Ньютона:

$$F = Nm\bar{v}.$$

Отсюда

$$\frac{e}{m} = \frac{2VI^2}{F}.$$

Сила F определялась сравнением с силой воздушной струи, вытекающей из капилляра на ртуть и образующей на её поверхности такое же углубление, как и электронный ток дуги. Давление струи измерялось механическим способом (взвешиванием). Опыты дали следующие результаты:

I (а)	v (см сек)	$\frac{e}{m}$
9	$1,9 \cdot 10^8$	$0,6 \cdot 10^7$
20	$2,3 \cdot 10^8$	$0,6 \cdot 10^7$
30	$2,0 \cdot 10^8$	$0,4 \cdot 10^7$

Улучшив методику определения давления на анод (анод делался из угля с просверленным каналом, давление в котором измерялось чувствительным манометром), Миткевич получил значения для $\frac{e}{m}$ от 0,8 до $1,56 \cdot 10^7$. Таким образом, была раскрыта роль электронов в дуговом разряде и тем самым найдены новые доказательства существования этих частиц.

Дж. Дж. Томсону принадлежит и первый метод прямого определения заряда этих частиц, а следовательно, и их массы. Метод Дж. Дж. Томсона основан на открытии, сделанном в 1897 г. К. Вильсоном (C. T. R. Wilson. Phil. Trans. A. p. 265, 189,7). Вильсон нашёл, что газовые ионы являются

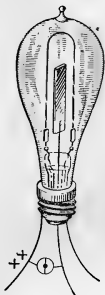


Рис. 169.
Опыт Эдисона

центрами конденсации водяных паров, если в ионизованном газе, лишённом пыли и насыщенном водяными парами, произвести внезапно охлаждение. В следующем 1898 г. в Кембриджской лаборатории Тоунсенд — ученик и сотрудник Томсона, определял заряд газовых ионов водорода или кислорода, полученных при электролизе, пропуская эти газы через воду и получая облако заряжённых частиц. Наблюдая осаждение этого облака и предполагая, что падение облака и его отдельных капелек подчиняется закону Стокса ($f = 6\pi\eta a q$), он определил радиус частиц, а взвешивая облако, определил суммарную массу этих частиц. Предполагая все частицы одинаковыми, он находил полное число частиц, на которое делил полный заряд облака. Таким путём он нашёл величину заряда $e = 3 \cdot 10^{-10}$ абс. эл. ед.

С 1898 г. начал работы по определению заряда газового иона Дж. Дж. Томсон. Он основывался на вышеупомянутом наблюдении К. Вильсона о конденсации тумана на ионах. Вместе с тем он использовал метод Тоунсенда об определении массы заряжённых частиц по наблюдению скорости падения облака, в предположении применимости закона Стокса. Определив эту массу и зная общую массу сконденсированной воды, можно определить число капелек. Подсчёт массы сконденсированной воды Томсон производил следующим образом. Если образование капель произошло при температуре t , а t_2 наиболее низкая температура, достигнутая при быстром расширении воздуха, то количество тепла, выделившееся единицей объёма воздуха при охлаждении от t до t_2 , равно $Q = CM(t - t_2)$, где C — теплоёмкость воздуха при постоянном давлении, которую Томсон принял равной $C = 0,167$, а M — масса единицы объёма воздуха, которую можно подсчитать по формуле:

$$M = \frac{0,00129}{x} \cdot \frac{273}{273 + \theta} \cdot \frac{P}{760}.$$

Здесь x — отношение объёма воздуха после расширения к величине объёма до расширения, θ — температура воздуха до расширения, P — упругость воздуха до расширения. Так как расширение происходит адиабатически, то температура t_2 , до которой охлаждается воздух, связана с x и θ соотношением

$$\frac{273 + \theta}{273 + t_2} = x^{0,41}.$$

Теплота Q равна теплоте конденсации Lq , где $L = 606$ — теплота парообразования, q — количество образовавшейся воды в кубическом сантиметре. При этом $q = \rho_1 - \rho$, где ρ_1 — плотность водяных паров в момент, когда начинает конденсироваться часть их, ρ — плотность паров при температуре t . Плотность ρ_1 определяется из выражения $\rho' = \frac{P}{x}$, где ρ' — плотность водяных насыщенных паров при температуре θ , определяемая из таблицы.

Из уравнения

$$Lq = L(\rho_1 - \rho) = CM(t - t_2)$$

получим, подставляя соответствующие значения

$$\rho = \frac{\rho'}{x} - \frac{0,167}{606} \cdot \frac{0,00129}{x} \cdot \frac{273}{273 + \theta} \cdot \frac{P}{760} (t - t_2).$$

Определив ρ , находим:

$$q = \frac{\rho'}{x} - \rho.$$

Зная массу $m = \frac{4}{3} \pi a^3$ одной частицы, найдём число частиц n в единице

объёма: $n = \frac{q}{m}$.

Прибор Дж. Дж. Томсона представляет собой сосуд A с водой и находящимся над ней воздухом, который подвергается ионизации рентгеновскими лучами. Сосуд сверху закрыт тонким алюминиевым диском, соединённым с землёй, вода соединяется с электрометром. Сосуд соединяется с широкой трубкой D . Внутри трубки D свободно ходит поршень P в виде стеклянной пробирки, обрезанной в нижней части. В трубке D находится вода, причём нижний край пробирки P всегда находится ниже уровня воды в D . Стеклянная трубка, проходящая через пробку D , соединяет внутреннее пространство над водой пробирки P с цилиндром R , в котором может производиться разрежение.

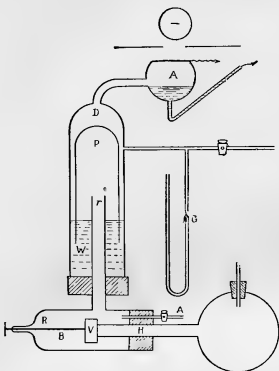


Рис. 170. Установка Дж. Дж. Томсона

$p = \frac{dV}{dt}$. Если поверхность воды S , плотность тока, идущего в A , равна i , ёмкость воды и электрометра C , то

$$Cp = iS.$$

С другой стороны, $i = neU \frac{V}{d}$, где n — число ионов в 1 куб. см, e — заряд иона, u — подвижность ионов, d — расстояние между поверхностью воды и алюминиевым диском. Отсюда

$$ne = \frac{Cp}{S} \cdot \frac{d}{V} \cdot \frac{1}{u}.$$

Подвижность ионов определялась предварительными опытами. Принимая, что все капельки заряжены (что не очевидно), Томсон нашёл для e значение:

$$e = 6,5 \cdot 10^{-10} \text{ абс. эл.-ст. ед.}$$

В 1899 г. Томсон производил ионизацию ультрафиолетовыми лучами и нашёл

$$e = 6,8 \cdot 10^{-10} \text{ абс. эл.-ст. ед.}$$

При разряжении в R пробирка P быстро падает, производя тем самым внезапное расширение в сосуде A .

Облако, образовавшееся в момент расширения в сосуде A , заряжено рентгеновскими лучами. Воде в сосуде A и соединённому с ней электрометру сообщается определённый потенциал V , который оставался неизменным до включения трубки.

Но вследствие ионизации воздуха потенциал изменяется со скоростью

В 1901 и в 1902 гг., применяя большие расширения и ионизацию радиоактивными лучами, Томсон нашёл значение

$$e = 3,4 \cdot 10^{-10} \text{ абс. эл. ед.}$$

При этом методе для коэффициента внутреннего трения Томсон полагал $\mu = 1,8 \cdot 10^{-4}$.

Метод Томсона, вообще говоря, содержит в себе источники многих ошибок. Но он имеет громадное историческое значение, проложив путь последующим исследованиям, приведшим к изобретению такого важного в атомной физике прибора, как камера Вильсона.

В 1903 г. в той же Кэвендишской лаборатории у Томсона Г. Вильсон внёс важное изменение в метод Томсона. В сосуде, в котором производится быстрое адиабатическое расширение ионизируемого воздуха, помещены пластинки конденсатора, между которыми можно создавать электрическое поле и наблюдать падение облака как при наличии поля, так и в его отсутствии. Измерения Вильсона дали значение для e :

$$e = 3,1 \cdot 10^{-10} \text{ абс. эл. ед.}$$

Метод Вильсона был использован многими исследователями, в том числе и студентами Петербургского университета Маликовым и Алексеевым (ЖРФХО, 1909, 41, стр. 247), которые нашли

$$e = 4,5 \cdot 10^{-10} \text{ абс. эл. ед.}$$

Это был наиболее приближающийся к истинному значению результат из всех полученных до того, как Милликен начал с 1909 г. измерения с отдельными каплями.

Так был открыт и измерен электрон — универсальная частица атомов, первая из открытых физиками так называемых «элементарных частиц».

Это открытие дало возможность физикам прежде всего по-новому поставить вопрос об изучении электрических, магнитных и оптических свойств вещества.

Объяснение
явления Зеемана.

Развитие электронной теории связано с именем Г. Лорентца. Мы уже говорили выше о работах Лорентца по электронной теории. Сейчас остановимся только на од-

ном явлении, изучение которого дало новый метод определения $\frac{e}{m}$ уже для связанных электронов, т. е. для электронов, находящихся внутри атомов, что явилось веским доводом в пользу мысли Томсона о внутриатомном происхождении корпускул.

В 1895 г. голландский физик Питер Зееман произвёл опыт, который ещё в 1862 г. пытался поставить Фарадей с целью обнаружить влияние магнитного поля на характер излучения источника света. Поместив пламя бунзеновой горелки с введёнными в него солями натрия между полюсами сильного электромагнита, Зееман изучал с помощью вогнутой решётки Роуланда спектр натрия и обнаружил расщепление спектральных линий в магнитном поле на дублет при наблюдении вдоль силовых линий и на триплет в направлении, перпендикулярном полю. Однако в первых опытах Зееман наблюдал только расширение и поляризацию краёв линий. Только в 1897 г., работая с тонкой голубой линией кадмия, усилив магнитное поле и усовершенствовав спектральную установку, Зееман нашёл указанное выше расщепление. В том же 1897 г. повторил этот эксперимент со своим интерферометром Майкельсон, который получил полное расщепле-

ние спектральных линий в соответствии с теорией, предложенной Г. А. Лорентцом. Теория Лорентца исходит из представления, что молекулы являются электромагнитными вибраторами. Входящие в их состав электроны связаны с центром квазиупругими силами, так что при смещении электронов из центра они колеблются по уравнениям:

$$x = a \cos(\nu_0 t + \varphi_1); \quad y = a_1 \cos(\nu_0 t + \varphi_2); \quad z = a_2 \cos(\nu_0 t + \varphi_3).$$

При включении магнитного поля к квазиупругой силе прибавляется сила Лорентца $\frac{e}{c}[\bar{v}\bar{H}]$, выведенная в 1892 г., и если магнитное поле H направлено по оси z , то дифференциальные уравнения движения электронов запишутся:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -\nu_0^2 x + \frac{eH}{c} \frac{dy}{dt};$$

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = -\nu_0^2 y - \frac{eH}{c} \frac{dx}{dt},$$

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = -\nu_0^2 z.$$

Последнее уравнение показывает, что колебание по оси совершается без изменения. Так как электромагнитный вибратор не излучает вдоль своей оси, то при наблюдении вдоль поля несмещённая линия отсутствует, она будет видна в виде линейно-поляризованной линии при наблюдении поперёк поля. Что же касается первых двух уравнений, то их решения могут быть записаны в виде:

$$x = a_1 \cos(\nu_1 t + \varphi_1); \quad y = -a_1 \sin(\nu_1 t + \varphi_1);$$

$$x = a_2 \cos(\nu_2 t + \varphi_2); \quad y = a_2 \sin(\nu_2 t + \varphi_2),$$

причём частоты ν_1 и ν_2 определяются уравнением

$$\nu_1^2 - \frac{eH}{mc} \nu_1 = \nu_0^2; \quad \nu_2^2 + \frac{eH}{mc} \nu_2 = \nu_0^2.$$

Это будут два круговых колебания с частотами, которые приближённо могут быть записаны в виде:

$$\nu_1 = \nu_0 + \frac{eH}{2mc}; \quad \nu_2 = \nu_0 - \frac{eH}{2mc}.$$

Измеряя эти частоты, можно измерить отношение $\frac{e}{m}$. Зеeman нашёл, что оно имеет порядок 10^7 . Об этой теории и докладывал Лорентц на конгрессе. Здесь напомним, что электронная теория возникла до открытия электрона, в качестве развития и дополнения теории Максвелла. Самый же факт открытия электрона поставил перед электродинамикой труднейшую проблему, не разрешённую до настоящего времени.

Открытие
рентгеновских
лучей.

Открытию электрона предшествовало знаменитое открытие Рентгена. Работая в декабре 1895 г. с разрядной трубкой, около которой находился флюоресцирующий экран, покрытый платино-синеродистым барием, он наблюдал свечение этого экрана.

Закрыв трубку чёрным чехлом, собираясь окончить опыт, Рентген обнаружил опять-таки свечение экрана при разряде. «Флюоресценция

видна, — писал Рентген в своём первом сообщении 28 декабря 1895 г., — при достаточном затемнении и не зависит от того, подносить ли бумагу стороной, покрытой или не покрытой платино-синеродистым барием. Флюоресценция заметна ещё на расстоянии двух метров от трубки».

«Легко убедиться, что причины флюоресценции исходят именно от разрядной трубки, а не от какого-нибудь места проводника»¹.

Рентген сделал предположение, что флюоресценция вызывается какими-то лучами (он назвал их X-лучами), проходящими через непроницаемый для обычных световых видимых и невидимых лучей чёрный картон чехла трубки. Поэтому он прежде всего исследовал поглощательную способность различных веществ по отношению к X-лучам. Он нашёл, что все тела проницаемы для этого агента, но в различной степени.

Лучи проходили через переплетённую книгу в 1000 страниц, через двойную колоду игральных карт. Еловые доски от 2 до 3 см толщиной поглощали лучи очень мало. Алюминиевая пластинка толщиной около 15 мм хотя и сильно ослабляла лучи, но не уничтожала их полностью.

«Если держать между разрядной трубкой и экраном руку, то видны тёмные тени костей в слабых очертаниях тени самой руки». Лучи действуют на фотографическую пластинку, причём «можно производить снимки в освещённой комнате, пользуясь пластинкой, заключённой в кассету или в бумажную оболочку»².

Рентген не мог, однако, обнаружить ни отражения, ни преломления рентгеновских лучей. Однако он установил, что, если правильное отражение «не имеет места, всё же различные вещества по отношению к X-лучам ведут себя так же, как и мутные среды по отношению к свету»³.

Таким образом, Рентген установил важный факт рассеяния рентгеновских лучей веществом. Однако все его попытки обнаружить интерференцию рентгеновских лучей дали отрицательный результат. Отрицательный результат дали и попытки отклонения лучей магнитным полем. Отсюда Рентген сделал вывод, что X-лучи не идентичны с катодными лучами, но возбуждаются ими в стеклянных стенках разрядной трубки. В заключение своего сообщения Рентген обсуждает вопрос о возможной природе открытых им лучей:

«Если поставить вопрос, чем собственно являются X-лучи (катодными лучами они быть не могут), то, судя по их интенсивному химическому действию и флюоресценции, можно отнести их к ультрафиолетовому свету. Но в таком случае мы сейчас же сталкиваемся с серьёзными препятствиями. Действительно, если X-лучи представляют собой ультрафиолетовый свет, то этот свет должен иметь свойства:



В. К. Рентген

¹ В. К. Рентген, О новом роде лучей, ГТТИ, 1933, стр. 27.

² Там же, стр. 29.

³ Там же, стр. 36.

- а) при переходе из воздуха в воду, сероуглерод, алюминий, каменную соль, стекло, цинк и т. д. не испытывать никакого заметного преломления;
- б) не испытывать сколько-нибудь заметного правильного отражения от указанных тел;
- в) не поляризоваться всеми употребительными средствами;
- г) поглощение его не зависит ни от каких свойств тела, кроме плотности.

Значит, нужно было бы принять, что эти ультрафиолетовые лучи ведут себя совсем иначе, чем известные до сих пор инфракрасные, видимые и ультрафиолетовые лучи.

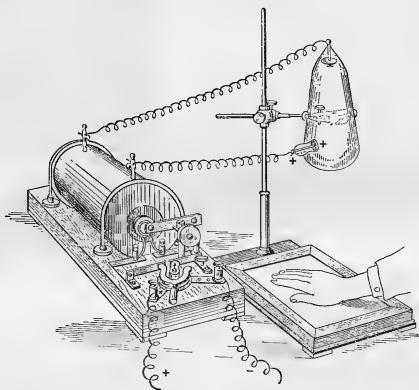


Рис. 171. Из первых рентгеновских установок

На это я не мог решиться и стал искать другое объяснение. Некоторое родство между новыми лучами и световыми лучами, повидимому, существует. На это указывают теневые изображения, флюоресценция и химические действия, получающиеся при обоих видах лучей.

Давно известно, что, кроме поперечных световых колебаний, в эфире возможны и продольные колебания. Некоторые физики считают, что они должны существовать. Существование их, конечно, пока не доказано с очевидностью, и свойства их поэтому экспериментально ещё не изучены.

Не должны ли новые лучи быть приписаны продольным колебаниям в эфире?

Я должен признаться, что всё больше склоняюсь к этому мнению, и я позволяю себе высказать здесь это предположение, хотя знаю, конечно, что оно нуждается в дальнейших обоснованиях¹.

Конечно, у Рентгена были веские основания сомневаться в единой природе световых и рентгеновских лучей, и правильное решение вопроса вы-

¹ В. К. Рентген, О новом роде лучей, стр. 40—42.

пало на долю физики XX в. Однако неудачная гипотеза Рентгена явилась вместе с тем свидетельством недостатка его теоретического мышления, склонного к одностороннему эмпиризму.

Тонкий и искусный экспериментатор, Рентген не испытал склонности к поискам нового, как ни парадоксально это звучит по отношению к автору одного из крупнейших в жизни физики новых открытий.

Открытие Рентгена вызвало огромный резонанс не только в научном мире, но и во всём обществе. «Можно представить себе интерес,— вспоминал впоследствии Шустер,— вызванный открытием в научном мире, и сенсацию, порождённую им в публике; было мало лабораторий, где тотчас же не явились бы попытки повторить этот опыт».

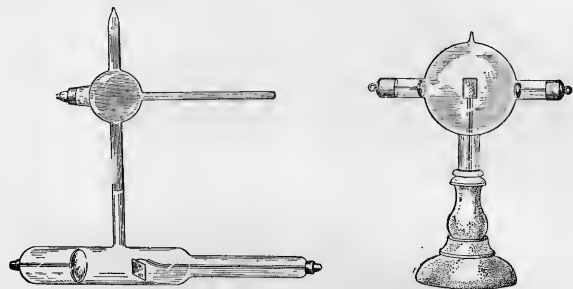


Рис. 172. Первые рентгеновские трубки

Особенно большой интерес к новому излучению проявили врачи. «Моя лаборатория была наводнена врачами, приводившими пациентов, подзревавших, что они имеют иголки в разных частях тела»,— писал Шустер. Этот практический интерес способствовал развитию рентгентехники, улучшению конструкции трубок, разработке высоковольтных установок для них и т. п. Ближайшим научным следствием открытия рентгеновских лучей было прежде всего открытие Томсоном их ионизирующего действия, выяснение механизма электропроводности газов и основных законов прохождения токов через газы при действии постоянного ионизатора. Было найдено нарастание тока при слабых электродвижущих силах по закону Ома, отклонение от этого закона при повышении напряжения и, наконец, наличие тока насыщения при достаточно высоких напряжениях. Исследования газового разряда при атмосферном давлении особенно эффективно проводились в лаборатории Кэвендиша в Кембридже (Дж. Дж. Томсоном со своими сотрудниками).

В марте 1896 г. Рентген выступил со вторым сообщением. В этом сообщении он описывает опыты по ионизирующему действию лучей и по изучению возбуждения X-лучей различными телами. В результате этих исследований он констатировал, что «не оказалось ни одного твёрдого тела, которое под действием катодных лучей не возбуждало бы X-лучей». Это привело Рентгена к изменению конструкции трубки для получения интен-

сивных рентгеновских лучей. «Я несколько недель с успехом пользуюсь разрядной трубкой следующего устройства. Катодом её является вогнутое зеркало из алюминия, в центре кривизны которого под углом 45° к оси зеркала помещается платиновая пластинка, служащая анодом».



Рис. 173. А. Беккерель в своей лаборатории

«В этой трубке X-лучи выходят из анода. Основываясь на опытах с трубками различных конструкций, я пришёл к заключению, что для интенсивности X-лучей не имеет значения, является ли место возбуждения лучей анодом или нет»¹. Тем самым Рентгеном были установлены основные черты конструкции рентгеновских трубок с алюминиевым катодом и платиновым антикатодом.

¹ В. К. Рентген, О новом роде лучей, стр. 50.

Открытие радиоактивности.

В том же 1896 г. А. Беккерель открыл радиоактивность. Это открытие было непосредственно связано с открытием рентгеновских лучей.

В своём докладе на конгрессе Беккерель указывал, что ему казалось очень мало вероятным, чтобы рентгеновские лучи могли существовать в природе только в тех сложных условиях, в каких они получаются в опытах Рентгена.

Беккерель, близко знакомый с исследованиями своего отца по люминесценции, обратил внимание на тот факт, что катодные лучи в опытах Рентгена производили при ударе одновременно и люминесценцию стекла и невидимые X-лучи. Это привело его к идее, что всякая люминесценция сопровождается одновременно испусканием рентгеновских лучей.

Эту идею впервые высказал А. Пуанкаре. В своей докторской диссертации М. Кюри-Склодовская пишет по этому поводу: «Первые рентгеновые трубки не имели металлического антикатада; источником рентгеновских лучей служила подвергнутая действию катодных лучей стеклянная стенка; при этом она сильно флуоресцировала. Можно было задаться вопросом, не является ли испускание рентгеновских лучей непременным спутником флуоресценции, независимо от причины последней. Эту мысль впервые высказал г. А. Пуанкаре¹.

Для проверки этой идеи Беккерель использовал большое количество люминесцирующих материалов, пока после ряда безуспешных опытов не поместил двух кристаллических пластинок урановой соли на фотографическую пластинку, завернутую в чёрную бумагу. Урановая соль подвергалась действию сильного солнечного света и через несколько часов экспозиции на фотографической пластинке было ясно обнаружено очертание кристаллов.

Таким образом, идея оказалась подтверждённой, солнечный свет возбуждал и люминесценцию соли урана и проникающую радиацию, действующую через бумагу на фотопластинку. Однако в дело вмешался случай.

Приготовив опять пластинку с кристаллом урановой соли, Беккерель вновь вынес её на солнце. День был облачный, и опыт после короткой экспозиции пришлось прервать. В последующие дни солнце не показывалось, и Беккерель решил проявить пластинку, не надеясь, конечно, получить хорошего снимка. Но, к его удивлению, снимок получился резко очерченным.

Как первоклассный исследователь, Беккерель не поколебался подвергнуть серьёзному испытанию свою теорию и начал исследовать действие

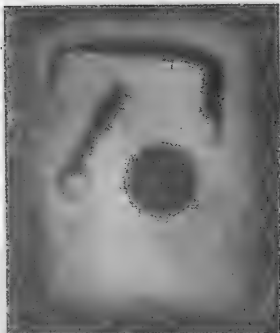


Рис. 174. Один из первых снимков с помощью радиоактивного излучения

¹ М. Склодовская-Кюри, Радий и радиоактивность, М., 1903, стр. 2.



Пьер Кюри

солей урана на пластинку в темноте. Так обнаружилось — и это Беккерель доказал последовательными опытами, — что уран и его соединения непрерывно излучают без ослабления лучи, действующие на фотографическую пластинку и, как показал Беккерель, способные также разряжать электроскоп, т. е. создавать ионизацию. Открытие это называлось сенсацией.

Особенно поражала способность урана излучать спонтанно, без всякого внешнего воздействия.

Рамзай рассказывает, что когда осенью 1896 г. он вместе с лордом Кельвином (В. Томсоном) и Д. Стоксом посетил лабораторию Беккереля, то «эти знаменитые физики недоумевали, откуда мог бы взяться неисчерпаемый запас энергии в солях урана. Лорд Кельвин склонялся к предположению, что уран служит своего рода западнёй, которая улавливает ничем другим не обнаруживаемую лучистую энергию, доходящую до нас через пространство, и превращает её в такую форму, в виде которой она делается способной производить химические действия».

Естественно, что внимание исследователей было обращено на поиски аналогичного свойства у других минералов.

Молодая супруга Пьера Кюри Мария Склодовская-Кюри решила избрать темой своей докторской диссертации исследование нового явления.

Исследование радиоактивности урановых соединений привело её к выводу, что радиоактивность является свойством, принадлежащим атомам урана, независимо от того, входят ли они в химическое соединение или нет. При этом она «измеряла напряжённость урановых лучей, пользуясь их свойством сообщать воздуху электропроводность»¹. Этим ионизационным методом она и убедилась в атомной природе явления.

«Тогда я занялась изысканиями, не существует ли других элементов, обладающих тем же свойством, и с этой целью изучила все (подчёркнуто мной. — П. К.) известные в то время элементы, как в чистом виде, так и в соединениях. Я нашла, что среди этих лучей только соединения тория испускают лучи, подобные лучам урана»².

Таков был результат огромной, изнурительной работы. К тому же результату пришли Э. Шмидт.

Но и этот скромный результат показал Кюри, что радиоактивность, несмотря на её необычайный характер, не может быть свойством только одного элемента. «С этого времени представилась необходимость найти новый термин для определения нового свойства материи, проявленного элементами ураном и торием. Я предложила для этого название «радиоактивность», которое сделалось общепринятым»³.

¹ М. Склодовская-Кюри, Радий и радиоактивность, стр. 4.

² М. Кюри, Пьер Кюри, М., 1924, стр. 44—45.

³ Там же, стр. 45.

Исходя из мысли о «весьма малой вероятности того, чтобы радиоактивность, рассматриваемая как атомное свойство, была присуща лишь известному виду материи», М. Кюри «стала исследовать, не являются ли радиоактивными и другие вещества, кроме урановых и ториевых соединений». В своей докторской диссертации она приводит список исследованных ею веществ:

1. «Все легко доступные металлы и металлоиды, также некоторые более редкие, в чистом виде, из собрания г. Э т а р а».

2. «Следующие редкие тела: галлий, германий, неодим, празеодим, ниобий, скандий, гадолиний, эрбий, самарий и рубидий (от г. Д е м а р с е), иттрий, иттербий с неозерием (от г. Ю р б е н а)».

3. «Большое количество чёрных пород и минералов»¹.

Для минералов Кюри получила следующие данные (в приведённой таблице i означает силу ионизационного тока в амперах).



М. Склодовская-Кюри

	$i \times 10^{-11}$		$i \times 10^{-11}$
Уран	2,3		
Смоляная обманка из		Различные ториты . . .	{ 0,1
Иоганнбергенштата .	8,3		{ 0,3
Смоляная обманка			{ 0,7
из Иохимсталя . . .	7,0		{ 1,3
» Пжвибрама	6,5		{ 1,4
» Коривалиса	1,6	Оранжит	2,0
Клевент	1,4	Монацит	0,5
Халколит	5,2	Ксенотим	0,03
Отёнит	2,7	Эсхинит	0,7
		Фергюсонит	0,4
		Самарснит	1,1
		Ниобит	0,3
		Карнотит	6,2

Внимание Кюри привлекли аномально большие значения радиоактивности некоторых руд. Чтобы выяснить, в чём дело, Кюри приготовила искусственный халколит из чистых веществ. Этот искусственный халколит, состоящий из азотнокислого уранила и раствора фосфорнокислой меди в фосфорной кислоте, после кристаллизации обладал «вполне нормальной активностью, отвечающей его составу: она в 2,5 раза менее активности урана».

«Поэтому стало весьма вероятным предположение, что смоляная обманка, халколит, отёнит обязаны своей сильной активностью присутствию небольшого количества какой-то сильно радиоактивной примеси, отличной от урана, тория и других известных тел. Если это так, то, — считала я, — можно надеяться обыкновенными приёмами аналитической химии извлечь из минерала это вещество»². «Живо заинтересованный этим вопросом, Пьер

¹ М. Склодовская - Кюри, Радий и радиоактивность, стр. 12.

² Там же, стр. 14.

Кюри оставил свою работу над кристаллами — временно, как он думал — и присоединился ко мне для исследования нового вещества»¹.

Начался поистине титанический труд супругов Кюри, проложивший путь человечеству к овладению атомной энергией. «Экспериментальный метод, которым нам предстояло пользоваться, — пишет М. Кюри, — должен был быть основан только на радиоактивных свойствах гипотетического вещества, ибо никаких других признаков его мы не знали. Вот как можно пользоваться радиоактивностью для подобных исследований: измерив активность препарата, подвергают его химическому разделению; затем, измеряя активность каждого из полученных продуктов, узнают, перешло ли радиоактивное вещество сполна в один из них или же оно распределилось между ними в некотором отношении. Мы имеем здесь аналитическое средство, в некотором отношении сравнимое с спектральным анализом»².

Этот новый метод химического анализа, разработанный Кюри, сыграл огромную роль в истории атомной физики, позволяя обнаруживать ничтожнейшие массы радиоактивного вещества.

В предстоящей им огромной работе супруги Кюри встретились с колоссальными трудностями, прежде всего внешнего порядка.

«В этот период нашей работы нам очень вредил недостаток необходимых средств: помещения, денег и персонала»³. С неистощимой энергией они преодолевали одно препятствие за другим. Не было денег для покупки урановой руды — они обходятся без этой руды, считая, что искомый радиоактивный остаток находится в отбросах уранового производства, «которые в то время никак не утилизировались». «Благодаря поддержке Венской академии наук нам удалось получить на выгодных условиях несколько тонн этих отбросов, и мы употребили их в качестве исходного материала».

«...Особенно важен был вопрос о помещении; мы не знали, где нам можно вести химическую переработку. Пришлось организовать её в заброшенном сарае, отделённом двором от мастерской, где находился наш электрометрический прибор. Это был барак из досок, с асфальтовым полом и стеклянной крышей, недостаточно защищавшей от дождя, без всяких приспособлений; в нём были только старые деревянные столы, чугунная печь, не дававшая достаточно тепла, и классная доска, которой так любил пользоваться Пьер Кюри. Там не было вытяжных шкафов для операции с вредными газами; поэтому приходилось делать эти операции на дворе, когда позволяла погода, или же в помещении при открытых окнах»⁴.

Поучительно сравнить эту обстановку с современными ядерными институтами, снабжёнными дорогостоящей первоклассной аппаратурой, оборудованными необходимой защитой от ядерных излучений. У Кюри не было даже вытяжных шкафов. Что же касается сотрудников, то сначала им приходилось работать в одиночестве. В 1898 г. в работах по открытию радия им оказал временную помощь преподаватель промышленной школы физики и химии Ж. Бемон; позже они привлекли молодого химика А. Дебьерна, открывшего актиний; затем им помогали физики Ж. Саньяк и несколько молодых физиков. Напряженный героический труд стал приносить результаты.

На заседании Парижской академии наук 18 июля 1898 г. Беккерель представляет доклад Пьера Кюри и Склодовской-Кюри «О новом радио-

¹ М. Кюри, Пьер Кюри, стр. 45.

² М. Склодовская-Кюри, Радий и радиоактивность, стр. 14.

³ М. Кюри, Пьер Кюри, стр. 46.

⁴ Там же, стр. 47.

активном веществе». «Мы стремились выделить это вещество, — говорится в докладе, — из урановой смоляной руды. Опыт подтвердил наши предположения. Проводя химические исследования, мы постоянно контролировали радиоактивность веществ, выделяющихся на научном данном этапе работы. Каждое из этих веществ помещалось на один из дисков конденсатора, и проводимость воздуха измерялась электрометром и прибором с пьезоэлектрическим кварцем.

В конце концов активность остаётся с висмутом. Поэтому мы полагаем, что вещество, выделенное из окиси урана, содержит неизвестный до сих



Рис. 175. Супруги Кюри в своей лаборатории

пор металл, близкий по своим свойствам висмуту. Если существование этого нового металла подтвердится, мы предлагаем назвать его **полонием**, в честь родины одного из нас¹.

26 декабря 1898 г. А. Беккерель представляет новое сообщение Пьера и Марии Кюри и Ж. Бемона «О новом сильном радиоактивном веществе, содержащемся в урановой смоляной руде». В этом сообщении мы читаем: «Во время наших исследований мы встретились с ещё одним весьма сильным радиоактивным веществом, по своим химическим свойствам резко отличающимся от полония. Так, полоний полностью осаждается под действием аммиака, тогда как новое вещество, весьма похожее по своему химическому поведению на барий, под действием аммиака не осаждается... Мы получили хлористые соединения этого вещества, причём они оказались в 900 раз активнее аналогичных соединений урана.

Демарсей подверг наше новое вещество спектральному анализу и обнаружил линию ($3814,8 \text{ \AA}$), не свойственную ни одному известному элементу. Интенсивность этой линии возрастала по мере возрастания радиоактивности хлористых соединений, обогащавшихся этим веществом, которое мы предлагаем назвать **радием**.

¹ М. Н а м и а с, Ядерная энергия, ИЛ, 1955, стр. 14—15.

«...Полминутного воздействия полония и радия достаточно, чтобы получить чёткие отпечатки на фотопластинках. Чтобы добиться таких же результатов с ураном и торием, необходимо несколько часов...»

16 октября 1899 г. акад. Вюль представил сообщение сотрудника Кюри химика Андре Дебьерна «о новом радиоактивном веществе». В этом сообщении говорится: «Я установил, что состав, содержащий титан и аналогичные ему вещества, обнаруживает очень большую радиоактивность (в 100 000 раз более сильную, чем радиоактивность урана). Более того, это вещество обладает химическими свойствами, совершенно отличными от химических свойств радия и полония». Этому новому веществу было по-

священо сообщение, сделанное Дебьерном в апреле 1900 г. Вещество было названо актинием.

«Все три новые радиоактивные вещества, — пишет М. Кюри, — находятся в смоляной обманке в ничтожно-малых количествах. Чтобы получить их в концентрированном виде, мы должны обработать несколько тонн остатков урановых минералов. Первая, грубая обработка выполняется на фабрике; затем идёт хлопотливый процесс очистки и концентрации. Таким образом нам

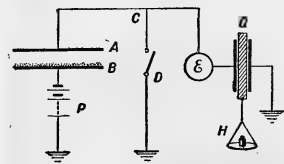


Рис. 176.

удалось извлечь из нескольких тысяч килограммов исходного продукта несколько дециграммов веществ, активность которых огромна сравнительно с активностью минерала, из которого они добыты. Понятно, что вся эта работа требует большой затраты труда, времени и денег»¹.

В докладе конгрессу супруги Кюри охарактеризовали изложенную выше историю получения новых радиоактивных веществ, указав, что «мы называем радиоактивными вещества, испускающие лучи Беккереля». Затем они изложили метод измерения радиоактивности. Этот метод описан в диссертации М. Кюри следующим образом.

«Существенная часть употреблявшегося здесь прибора — плоский конденсатор АВ (рис. 176). Активное вещество в виде слоя тонкого порошка, помещённое на обкладке, делает воздух между обкладками проводящим. Для измерения его электропроводности сообщают обкладке В высокий потенциал, соединяя её с полюсом батареи маленьких аккумуляторов Р, другой полюс которой отведён к земле. Когда посредством проволоки СД другая обкладка А отведена к земле, между обкладками возникает электрический ток. Потенциал обкладки А указывается электрометром Е. Если прервать в С сообщение с землёй, обкладка А заряжается и электрометр даёт отклонение. Скорость отклонения пропорциональна силе тока и может служить для её измерения.

Однако предпочтительнее производить измерения, компенсируя заряд обкладки А, так чтобы электрометр оставался на нуле. Заряды, о которых здесь идет речь, чрезвычайно слабы; их можно компенсировать пьезоэлектрическим действием кварца Q, одна обкладка которого сообщается с пластинкой А, другая — с землёй. Кварцевую пластинку подвергают действию известной вытягивающей силы, нагружая чашку Н. Тяга приводится в действие мало-помалу, вследствие чего во время измерения постепенно

¹ М. Складовская - Кюри, Радий и радиоактивность, стр. 16.

развивается известное количество электричества. Процесс этот можно регулировать так, чтобы компенсация обоих количеств электричества, проходящего через конденсатор и противоположного ему, имеющего источник в деформации кварца, имела место в каждый момент»¹.

Этот метод, в котором П. Кюри использовал изученные им совместно с братом Жаком свойства пьезокварца, стал классическим методом, обычно употреблявшимся в Парижском институте радия. Этим методом Кюри установили, что «радиоактивность представляет собой явление, измеримое довольно точно», а полученные цифры активности урановых соединений дали возможность высказать гипотезу о существовании весьма активных веществ, приведшую при своей проверке к открытию полония, радия и актиния. В докладе содержалось описание свойств новых элементов, спектр радия, приблизительная оценка его атомной массы, эффекты радиоактивного излучения.

Что касается природы самих радиоактивных лучей, то для её исследования изучалось действие магнитного поля на лучи и проникающая способность лучей. П. Кюри показал, что излучение радия состоит из двух групп лучей: отклоняемых магнитным полем и не отклоняемых магнитным полем. Исследуя отклоняемые лучи, супруги Кюри в 1900 г. убедились, что «отклоняемые лучи β заряжены отрицательным электричеством».

«Таким образом, — резюмирует Кюри результаты экспериментов по исследованию заряда β -лучей, — отклоняемые радиевы лучи β , подобно катодным, переносят электричество. Но до сих пор ещё не было обнаружено существования электрических зарядов, которые не были бы связаны с веществом. Поэтому при измерении отклоняемых радиевых лучей β можно пользоваться той же теорией, какая в настоящее время является принятой для катодных лучей. По этой «баллистической» теории, предложенной сэром У. Круксом, впоследствии развитой и усовершенствованной г. Дж. Дж. Томсоном, катодные лучи состоят из чрезвычайно тонких частиц, отбрасываемых с огромной скоростью с катода и заряженных отрицательным электричеством. Таким же образом можно принять, что и радий посылает в пространство отрицательно заряженные частицы»².

Потребовалось исследовать ближе природу этих частиц. Первые определения $\frac{e}{m}$ радиевых частиц принадлежали А. Беккерелю (1900).

«Опыты г. Беккереля дали первое указание по этому вопросу. Для $\frac{e}{m}$ получилось приближённое значение в 10^7 абсолютных электромагнитных единиц, для v значение в $1,6 \cdot 10^{10}$ см в секунду. Порядок этих чисел тот же, что для катодных лучей».

«Точные исследования по этому вопросу принадлежат г. Кауфману (1901, 1902, 1903)... Из опытов г. Кауфмана следует, что для радиевых лучей, скорость которых значительно больше скорости катодных, отношение $\frac{e}{m}$ убывает с увеличением скорости. В соответствии с работами Дж. Дж. Томсона и Тоунсенда мы должны принять, что представляющая луч движущаяся частица обладает зарядом, равным тому, который переносится водородным атомом при электролизе. Этот заряд для всех лучей одинаков. На этом основании следует заключить, что масса частиц тем больше, чем больше их скорость»³.

¹ М. Склодовская - Кюри, Радий и радиоактивность, стр. 5—6.

² Там же, стр. 41.

³ Там же, стр. 43.

Отклонение α -лучей в магнитном поле было получено Резерфордом в 1903 г. Резерфорду же принадлежат названия: α -, β - и γ -лучи.

«1. Лучи α (альфа) обладают весьма малой проникающей способностью; они, повидимому, составляют главную часть излучения. Для них характерна поглощаемость материей. Магнитное поле действует на них очень слабо, так что их сначала считали нечувствительными к его действию. Однако ж в сильном магнитном поле лучи α несколько отклоняются, отклонение происходит подобно тому, как для катодных лучей, лишь в обратном смысле...»

2. Лучи β (бэта) являются вообще мало поглощаемыми сравнительно с предыдущими. В магнитном поле они отклоняются таким же образом и в том же смысле, как лучи катодные.

3. Лучи γ (гамма) отличаются большой проникающей способностью; магнитное поле не действует на них; они сходны с лучами Рентгена¹.

Так резюмирует в 1904 г. М. Кюри результаты исследований свойств радиоактивных лучей. В 1900 г. это разделение лучей на три группы ещё не существовало. Не были известны ещё физиологические действия лучей и их энергия. Первое сообщение о физиологических действиях лучей, сделанное В а л ь х о ф о м, появилось в октябре 1900 г. Пьер Кюри произвёл на себе следующий рискованный эксперимент: «В одном опыте г. Кюри подверг свою руку десятичасовому действию препарата, имеющего сравнительно слабую активность. Краснота обнаружилась немедленно, а позднее образовалась рана, которая потребовала четырех месяцев для излечения»².

П. Кюри был первым человеком, испытавшим на себе разрушительное действие ядерной радиации. Он был и первым, кто доказал существование ядерной энергии и измерил её величину, выделяемую при радиоактивном распаде. В 1903 г. он вместе с Лабордом, нашёл что *«соли радия являются источником теплоты, выделяющей непрерывно и самопроизвольно»* «...Количество выделяемой радием теплоты может быть оценено с помощью Бунзенова ледяного калориметра. Помещая в этот калориметр стеклянную трубочку с радиевой солью, наблюдаем постоянный приток тепла, который прекращается вместе с удалением радия. Измерение, произведённое с давно приготовленной радиевой солью, показало, что каждый грамм радия выделяет около 80 малых калорий в час. Таким образом, в течение часа радий выделяет столько тепла, сколько нужно для расплавления равного ему по весу количества льда; грамм-атом радия (т. е. 225 г) выделил бы в час 18 тыс. калорий — количество тепла, сравнимое с тем, которое получается при сгорании одного грамм-атома (т. е. 1 г) водорода. Столь значительное выделение теплоты не может быть объяснено никакой обыкновенной химической реакцией, тем более, что состояние радия, повидимому, годами остаётся без перемен. Можно думать, что выделение тепла зависит от превращений, которым подвергается атом самого радия и которые необходимо являются весьма медленными. *Если бы это было так, то надо было бы заключить, что количества энергии, выступающие на сцену при образовании и превращении атомов, являются весьма значительными и превосходят всё, что нам известно в этом отношении»*³ (подчёркнуто мной. — П. К.).

Пьер Кюри хорошо сознавал и громадные общественные последствия своего открытия. В том же году в своей нобелевской речи он сказал следующие пророческие слова, которые М. Кюри поставила эпиграфом к своей книге о нем:

¹ М. С к л о д о в с к а я - К ю р и, Радий и радиоактивность, стр. 34.

² Там же, стр. 72.

³ Там же, стр. 66—67.

«Нетрудно предвидеть, что в преступных руках радий может сделаться крайне опасным, и вот возникает вопрос, действительно ли полезно для человечества знать секреты природы, действительно ли оно достаточно зрело для того, чтобы их правильно использовать, или это знание принесёт ему только вред. Пример сделанного Нобелем открытия является в этом отношении характерным. Мощные взрывчатые вещества позволили людям совершить замечательные деяния, и они же явились страшным средством в руках великих преступников, толкавших народы на путь войны. Я принадлежу к числу тех, которые, подобно Нобелю, считают, что всё же новые открытия в конечном счёте приносят человечеству больше пользы, чем вреда»¹.

Учёного гуманиста, испытывшего на себе всю тяжесть «незрелого» капиталистического общества, «где царствует жажда роскоши и богатства» (М. Кюри), тревожит будущее великого открытия. История показала, что «в руках великих преступников, толкавших народы на путь войны», атомная энергия явилась источником неслыханных бедствий и разрушений. Но она же является неисчерпаемым источником энергии, полное овладение которым «навсегда сняло бы с человечества заботу о необходимых для его существования на земле запасах энергии»².

Социалистическое общество, в котором впервые в мире атомная энергия стала служить мирным целям, обеспечивает победу гуманистических идеалов Кюри.

В заключение приведём описание доклада супругов Кюри, сделанное участником конгресса профессором Новороссийского (Одесского) университета Н. Д. Пильчиковым.

«Я хочу поделиться теми неизгладимыми впечатлениями, которые доставил замечательный доклад Кюри участникам первого всемирного конгресса физиков...

Я сказал уже, что физический конгресс имел особое заседание (в Jardin des Plantes³, в Музее естественной истории), посвящённое ознакомлению с загадочными лучами. Громадная аудитория музея переполнена членами конгресса. Все с нетерпением ожидают сообщения Кюри... Чета Кюри, обменявшись несколькими фразами, разделяется. Муж выходит на кафедру, жена ассистирует.

Рассказал кратко о длинном ряде опытов по разысканию и отделению всё более и более радирующих веществ из первоначальной минеральной массы с одной стороны гг. Кюри, а с другой г-ном Дебьерном; о том, что опыты гг. Кюри привели прежде всего к открытию нового радирующего металла, по своим химическим свойствам аналогичного висмуту, — металла, который г. Кюри назвал в честь родины своей супруги п о л о н и е м (жена Кюри — полька, урождённая Склодовская); что дальнейшие их опыты привели к открытию второго сильно радирующего нового металла — р а д и я, весьма близкого по химическим свойствам к барию; что опыты Дебьерна послужили к открытию третьего радирующего нового металла — а к т и н и я, аналогичного торию. Далее г. Кюри приступил к самой интересной части своего доклада — к опытам с радием.

Несколько дециграммов хлористого радия с хлористым барием, заключённые в алюминиевую коробочку, были помещены в расстоянии нескольких сантиметров от шарика заряжённого электроскопа с золотыми листочками. В несколько секунд листочки электроскопа опали: лучи радия разря-

¹ М. Кюри, Пьер Кюри, стр. 5.

² Речь акад. И. В. Курчатова на XX съезде КПСС, «Правда» от 22 февраля 1956.

³ Ботанический сад.

дили электроскоп. Они, подобно рентгеновским лучам, разряжают все тела — проводники и изоляторы, каким бы электричеством (положительным или отрицательным) эти тела ни были заряжены. Следующий опыт обнаружил уменьшение сопротивления воздуха прохождению через него разрывного электрического разряда в виде искр. Была приведена в действие катушка Румкорфа, возникающий в ее вторичной обмотке электрический ток высокого напряжения устремляется по двум тождественным цепям, имеющим одинаковые разрывы (каждая цепь имеет два медных шарика, расстояние которых друг от друга в обеих цепях одинаково). После того как обоим разрывам дали наибольшую длину, при которой ещё искра перескакивает, к одному из них поднесли радий. Тотчас поток искр в этом разрыве значительно усилился, а в другом совсем прекратился. Этот опыт очень эффектен — он вызвал единодушные аплодисменты конгресса.

Следующий опыт демонстрировал влияние лучей радия на сгущение водяного пара. Лет десять назад Роберт Гельмгольц (сын знаменитого физиолога и физика) заметил, что электрический разряд, происходящий вблизи струйки водяного пара, выходящей, например, из стеклянной трубки, плотно вставленной в колбочку с кипящей водой, изменяет строение этой струйки. Из малозаметной почти прозрачной она становится густой малопрозрачной вследствие конденсации капелек. Радий, поднесённый весьма близко к струйке пара, вызвал слабое изменение в её строении.

Перечисленные опыты завершились демонстрацией светимости радия. Стеклянная трубка, толщиной в карандаш и длиной в мизинец, наполненная до двух третей смесью хлористых радия и бария, излучает в течение двух лет настолько сильный свет, что вблизи него можно свободно читать. Не будь цена хлористого радия крайне высока (во много раз выше цены золота), вопрос об экономическом источнике света можно было бы считать блестяще разрешённым: радий светит с одним и тем же напряжением, независимо ни от температуры, ни от всех других испробованных условий; в течение двух лет он не требует затраты какой бы то ни было известной нам другой энергии и, следовательно, даёт свет вполне безвозмездно¹.

Последние слова звучат весьма наивно и свидетельствуют ещё об очень слабом знакомстве с радиоактивностью в начале XX в. Однако это слабое знание радиоактивных явлений не помешало возникнуть и развиться новой отрасли промышленности: радиевой промышленности. Положив в основу разработанные Кюри методы извлечения радия из руд (Кюри отказались от патентных прав), французские, а затем американские промышленники стали изготавливать радий для медицинских и научных целей. Стоимость радия была очень велика и доходила до 200 руб. золотом за 1 мг радия. Эта промышленность была зачатком будущей атомной промышленности.

Космическая
и биологическая
физика.

Успехи атомной физики в наше время коренным образом повлияли на развитие астрофизики и биофизики. Мысль о том, что радиоактивные процессы могут пролить свет на источники энергии Солнца и звёзд стала

появляться уже в начале XX в. Ф. Содди, который вместе с Резерфордом обосновал в 1902—1903 гг. гипотезу радиоактивного распада, писал в своей книге «Радий»:

«Открытие радиоактивности и данные им указания на не подозревавшиеся в природе запасы энергии, доступной для космических целей, неизбежно представили весь вопрос эволюции, прошлой истории и будущей

¹ Н. Д. Пильчиков, Радий и радиоактивность (сборник «Успехи физики»), вып. 1, изд. 3, Матезис, 1910, стр. 31—33.

судьбы Вселенной в новом свете. Вот одно из заключений всеобщего интереса, вытекающее из недавних открытий.

В этом ничтожном зёрнышке радия нет ничего, говорящего об огромном масштабе и размерах Вселенной. Однако по сравнению со своей массой оно отдаёт энергию с такой скоростью, как ни одно солнце, ни одна планета... Все могучие средства современной лаборатории — крайние пределы тепла, холода и давлений, энергичные химические реактивы, действие могучих взрывчатых веществ и самые сильные электрические разряды — не оказывают влияния на радиоактивность радия или на скорость его работы даже в самой ничтожной степени. Он черпает свои запасы энергии из неизвестного до наших дней источника и подчиняется ещё не открытым законам. Есть что-то возвышенное в его отчуждённости от окружающей среды и в его индифферентности к ней. Он как будто ведёт свою родословную от миров, лежащих вне нас, питаемый тем же неугасимым огнём, движимый тем же лежащим вне нашего контроля механизмом, который поддерживает свет солнца в небесах в бесконечные периоды времени¹.

Конечно, не этими мыслями руководились устроители конгресса, организуя секцию космической физики, но все же появление этой секции следует признать весьма знаменательным.

Появление этой секции означало, что после открытия спектрального анализа и законов излучения физика могла уже помогать существенно и астрономии, родилась астрофизика.

Биркеланд делал доклад о физическом строении Солнца, Крова — о солнечной постоянной, Дюфур — о фотометрии звёзд. Наряду с этими астрофизическими проблемами стояли и геофизические. Экснер делал доклад об атмосферном электричестве, Паульсен — о северных сияниях, Гагенбах — об оптике льда, Сарасен и Ферель — о колебаниях озёр.

Изложение этих работ не входит в нашу задачу. Отметим только, что в актинометрических исследованиях большое участие принимали русские учёные О. Д. Хвольсон, В. А. Михельсон.

И, наконец, вопросы биофизики. Здесь были заслушаны доклады Д. Арсонваля — о действии токов высокой частоты на организм, Брока — о передаче энергии в организме, Шарпантье — о физических явлениях на сетчатке, Чернинг — об аккомодации, Хэнок — о применении спектрального анализа к биологической физике.

Новая отрасль физики возникла как область применения физических методов в изучении жизненных явлений. Начало было положено классическими исследованиями Гельмгольца по физиологической акустике и физиологической оптике. Объективную теорию цвета и цветовых ощущений построил Максвелл.

Широко использовал объективный физический эксперимент при решении физиологических вопросов великий русский физиолог Иван Михайлович Сеченов, начавший разработку сложнейшей проблемы физиологии — высшей нервной деятельности.

Физиолог Дюбуа Реймон (1868—1896) разрабатывал вопросы электрофизиологии с помощью сконструированного им чувствительного гальванометра. Физические методы лечения, в частности электрические, начала применять медицина.

Всеми этими исследованиями было положено начало большой совместной работы физиологов, врачей и физиков в XX в.

¹ Ф. Содди, Радий и строение атома, Одесса, 1923, стр. 22—23.

Великий русский физиолог Иван Петрович Павлов проложил путь к познанию законов высшей нервной деятельности с помощью строго объективного экспериментального метода.

Следует упомянуть и ещё об одной важнейшей проблеме, в которой рука об руку шли физика и биология — это проблема фотосинтеза. Основным успехом в решении этой крупнейшей энергетической проблемы мировая наука в XIX в. была обязана великому русскому учёному Клименту Аркадьевичу Тимирязеву.

Таким был актив, с которым физическая наука вступила в XX столетие. Она вступила в него вместе с выросшими из её открытий электротехникой и радиотехникой, с намеченной задачей исследования законов атомных явлений, к решению которой настойчиво призывали её великие открытия, сделанные на рубеже XX столетия: открытие электрона, открытие рентгеновских лучей, открытие радиоактивности, открытие квант.

Наряду с этими новыми отраслями неизмеримо расширились старые области физики: механика, теплота и молекулярная физика, оптика и электричество. Было накоплено огромное количество новых фактов, разработаны новые теоретические концепции, установлены новые взаимосвязи. Нарастающая масса новых открытий и исследований поставила на повестку дня вопрос об организации накопленного материала, о методах овладения им.

Весьма симптоматичной в этой связи является статья французского физика Гильома «Будущее научных исследований», в которой автор ставит вопрос об овладении бурно развивающимся потоком научных исследований. Рост армии учёных, научных журналов, книг, исследований заставляет автора статьи с тревогой спросить:

«... Разумно ли, чтобы такое количество людей продолжало обогащать науку, если придёт время, когда ни один человек не в состоянии будет изучать найденное его предшественниками?»

Автор указывает на те тенденции в развитии науки, которые, по его мнению, позволяют овладеть знаниями, несмотря на их непрерывное увеличение. Во-первых, «процесс промышленности и общий строй науки исключает науки, сделавшиеся бесполезными, и даёт возможность заменить их другими».

Таким образом, в развитии науки не происходит простое накопление, а непрерывное замещение одних идей другими — «одно исследование заменяется другим». Вследствие этого «постоянно устанавливается равновесие между новым и старым, между тем, что завоёвано при прогрессивном развитии человеческого разума, и тем, что стало отбросом на его пути».

Это обстоятельство облегчает задачу научного обучения. Другим облегчающим моментом является всё более концентрированное, «сгущённое» и обобщённое выражение научных фактов. На смену частных геометрических методов пришли аналитическая геометрия и анализ. Громадную роль играют в физике законы сохранения, дающие возможность рассмотреть с единой точки зрения разнообразные факты.

Наконец, рациональная организация и систематизация науки: реферативные журналы, справочники и т. д. позволяют ориентироваться в многообразном потоке человеческого знания.

Гильом не делает, однако, решающего вывода о необходимости управлять развитием науки, планировать её и направлять этот поток наиболее разумным и целесообразным образом, ибо капиталистическое руководство наукой не в состоянии решить такую задачу. Но потребность разобраться в вопросе «о будущем научных исследований» уже появилась, и это один

из признаков, указывающих на то, что наука вступила в такую стадию развития, которая не соответствует более сложившимся в обществе капиталистическим отношениям.

**Картина
развития науки
в отдельных
странах.**

Непрерывное накопление физических знаний, о котором шла речь в предыдущих разделах этой главы, создаёт в уме картину единого потока, текущего независимо от конкретных исторических условий и направляемого единой целью — познания истины.

Но, конечно, действительное развитие науки не имеет ничего общего с этой идеальной картиной. Хотя научные истины имеют общечеловеческое значение, самый процесс познания этих истин совершается в конкретной исторической обстановке, каждое научное открытие имеет свою родину и время рождения.

В развитии науки, как и во всех других областях человеческой деятельности, проявляется в сильной степени дух соревнования и соперничества как между отдельными учёными, так и между нациями. Период начавшегося упадка капитализма отмечен обострением капиталистической конкуренции, проявляющейся и в самом развитии науки.

Стремление опередить своих соперников заставляет страны усиленно форсировать развитие научных учреждений и учебных заведений, имеющих важное значение для развития капиталистической экономики.

Закон неравномерного развития капитализма проявляется и в той лихорадочной поспешности, с какой молодые капиталистические страны (Америка, Германия, Япония) стремятся догнать и перегнать Англию, Францию и другие европейские страны со старой научной культурой. Рассмотрим в этой связи картину развития науки и научного образования в отдельных странах мира.

Этот обзор мы начнём со старейшей страны университетского образования — Франции. Парижский университет, как известно, самый старый в мире (начало XII в.). Вместе с тем Франция была первой страной, начавшей подготовку инженерных кадров на научной основе и осуществившей организацию науки на новых началах, отвечающих интересам буржуазного строя. Эти меры обеспечили Франции ведущее положение в области точных наук и химии в первой половине XIX в.

Однако усиление реакции после реставрации и в эпоху второй империи серьёзно подорвали научное образование во Франции. Засилие духовенства в системе начального и среднего образования губительно отразилось на судьбе Франции и, в частности, сыграло свою роль в роковом для неё исходе франко-прусской войны 1870 г. «Бедствия 1870 года показали Франции, каким упадком духовного уровня угрожает нации её полная недостатков образовательная система», — читаем мы в истории XIX в., написанной французскими учёными Лависсом и Рамбо. Следует к этому прибавить, что прусская военная машина в период оккупации Франции проявила все те черты, которыми в последующем «прославила» себя гитлеровская армия. Пруссаки разгромили всемирно известную лабораторию Реньо, разрушили научную аппаратуру, сожгли материалы экспериментальных наблюдений. «Можно извинить римского солдата, убившего Архимеда, — он не знал его, — говорил Реньо навестившему его русскому физику Н. А. Любимову, указывая на исковерканные приборы и пепел от сожжённых журналов наблюдений, — это же обличает руку знатока». Действительно, пруссаки со знанием дела глумились над древней французской культурой.

Учитывая уроки войны, французы предприняли ряд мер по реорганизации начального и высшего образования, в результате которых, по словам



А. Реньо

тех же французских историков, «высшее образование было поднято... на тот уровень, которого оно достигло в иностранных университетах».

В 1900 г. во Франции было 17 университетов — столько же, сколько их было при Наполеоне Бонапарте; кроме того, была Высшая нормальная школа в Париже, Политехническая школа, Колледж де Франс и ряд специальных технических и медицинских школ (общим числом около 18). Из специальных школ отметим открытую в 1882 г. Парижскую школу физики и индустриальной химии (типа техникума), Парижскую высшую школу электричества, открытую в 1894 г.

Во всех высших учебных заведениях и научных учреждениях Франции вели научную и педагогическую работу по физике около 90 человек. В числе их были академики (члены института) Буссинеск, Аппель, А. Пуанкаре, Лип-

пман, Виоль, Маскар, Корню, А. Беккерель, Потье. Упомянем не вошедших в это число математиков и астрономов: Эрмита, Жордана, Пикара, Фая, Жансена. Эти имена, как и другие, не приведённые нами, говорят о солидной математической традиции французской науки.

Из более молодых учёных в этот период выдвигались супруги Кюри, Ж. Перрен, Ланжевен. Упомянем ещё об Амага, Бриллюене, Вейсе, Пелла, Фабри и Перо. Как видно, Франция к началу XX столетия располагала довольно крепким отрядом физиков.

Старые научные традиции имелись и в Англии. Её древние университеты Кембриджский и Оксфордский, в особенности первый, имели славную научную историю. В знаменитом Триптити-колледже Кембриджского университета учились и работали первоклассные учёные Англии, начиная с Ньютона. К числу старинных университетов относились университеты Шотландии: Эдинбургский, Глазговский, Абердинский, св. Эндрюса и Дублинский в Ирландии.

В 70-х и 80-х годах было создано 10 новых университетских колледжей и два технических колледжа в Лондоне. Всего в Великобритании насчитывалось в 1900 г. 26 университетов и колледжей, в Ирландии 3, в Канаде 5, в Австралии и Новой Зеландии 7.

В Индии было 5 университетов, однако в них никакой учебной работы не велось, а только принимались кандидатские экзамены (аналогичный университет был и в Лондоне). Для учебных целей было несколько десятков колледжей, мало отличавшихся от средних учебных заведений, из которых наиболее крупными были колледжи св. Ксаверия в Бомбее (1450 учащихся), Калькутте (400 учащихся), Главный колледж в Калькутте (600 учащихся), Центральный колледж в Бангалуре (400 учащихся). Остальные колледжи имели число учащихся, не превышающее 200 человек, и даже всего несколько десятков человек.

Следует отметить, что число учащихся в этих колледжах было ничтожно мало по отношению к громадному населению Индии.

Таким образом, в общем балансе наук Британской империи роль её колоний и доминионов в 1900 г. была ничтожной. Отметим, однако, что такой выдающийся английский физик, как Эрнст Резерфорд, вышел из Новой Зеландии и в 1900 г. был профессором физики в Канаде (университет в Монреале). Всего в Англии, Ирландии и Канаде в 1900 г. работало около 100 физиков во главе с престарелым В. Томсоном. К числу упомянутых уже физиков, бывших на Международном конгрессе, прибавим ещё имена Д. Г. Стокса, Д. Дарвина, Д. А. Юинга, П. Тэта, О. Лоджа, К. Пирсона, Дж. А. Флеминга, В. Рамзая, А. Шустера, О. Рейнольдса, Релея, Крукса. Все эти люди и ряд других обогатили английскую и мировую науку своими открытиями. Английская физика вошла в XX в. с прочно занятыми позициями.



Э. Резерфорд

Италия также принадлежит к числу стран со старым университетским образованием. Все двадцать университетов Италии возникли ещё в эпоху средневековья и в начале новой истории. Из специальных учебных заведений в Италии был только один технический институт в Милане. Чрезвычайно пагубно (в этом отношении особенно пострадала Испания — также страна старых университетов) отразилось на итальянской науке и просвещении влияние католической церкви. Число физиков в Италии было почти вдвое меньше английских (около 50). Кроме названных нами Риги и Леви-Чивита, в этот период пользовались известностью имена итальянских электриков Паччинотти и Феррариса и физика Блазерна.

Видное место занимала голландская физика. В небольшой группе голландских учёных (12—15 человек), работавших в четырёх университетах страны и одной технической школе, блистали имена Ван-дер-Ваальса, Лорентца, Зеемана, Камерлинга-Оннеса.

В шести университетах и одной технической школе Швейцарии работали наряду со швейцарскими французские и немецкие учёные. В Цюрихской политехнической школе работал учитель Эйнштейна Герман Минковский.

В университетах скандинавских стран работали такие выдающиеся учёные, как Сванте Аррениус (Стокгольмский университет), В. Бьеркнес, К. Ангстрем, Ридберг (Швеция), Биркеланд (Норвегия). В Копенгагене физику возглавлял Христиансен.

Лоскутная Австро-Венгрия насчитывала в 1900 г. 11 университетов, 9 высших технических учебных заведений (из них три горные школы).

К старинным университетам Праги, Кракова, Львова, Граца, Вены, Инсбрука прибавились университет в Черновицах (1875), Будапеште (1874), Клаузейнбурге (в Венгрии) (1872). Из 53 физиков, работавших в этих учебных заведениях, австрийцев было 33, венгров 8, поляков 6, чехов 4, югославов 1.



И. Поггендорф

Физиков Венгрии возглавлял президент Венгерской академии наук Лоранд Этвеш, в Будапеште работал один из изобретателей трансформатора видный электрик Циперновский. Из учёных, работавших в Австрии, назовём Ольшевского, Натансона, Закржевского, из чехов — Строхалю и Новака.

В 1900 г. из видных австрийских физиков работали: М. Смолуховский, бывший профессор Краковского университета, Фр. Экспер — профессор Венского университета, Э. Лехер — профессор Пражского университета. Людвиг Больцман в это время был в Германии, в Лейпциге, Стефан (1835 — 1895) уже умер.

Если первая половина XIX столетия, отмеченная в физике именами Ампера, Френеля, Мамоса, Араго и других деятелей французской науки, проходила под знаком преобладания Франции, то теперь (оставляя пока в стороне Рос-

сию) отчётливо ощущается преобладание и соперничество Англии и Германии.

Германия укрепила и развила свои старинные 20 университетов, построила ряд физических институтов и прибавила к действовавшим в первой половине века техническим школам в Дрездене, Штутгарте и Карлсруэ шесть новых высших технических учебных заведений: в Мюнхене (1868), Дармштадте (1868), Аахене (1870), Ганновере (1879), Берлине (1879), Брауншвейге (реорганизован в 1894 г.).

По числу высших технических учебных заведений Германия опережала (за исключением России) любую из стран мира. Она опережала и по числу учащихся в этих учебных заведениях. Германия обладала и наиболее мощным отрядом физиков (по справочнику «Минерва» на 1900—1901 гг. 120 человек). Мы уже приводили имена некоторых из этих физиков, участвовавших в Парижском конгрессе.

Приведём для полноты характеристики список физиков Геттингенского университета. В 1900—1901 гг. в Геттингене работали Э. Рикке, В. Нернст, Т. де Кудр, Э. Вихерт, Г. Симон, М. Абрагам, В. Кауфман; математики: Ф. Клейн, Д. Гильберт, Э. Цермелло. Один этот список показывает, каких крупных успехов добилась Германия в области развития точных наук.

В течение последнего тридцатилетия XIX столетия обозначился перелом в Америке в сторону культивирования в стране так называемой «чистой науки». Америка зарекомендовала себя в области технических открытий в лице известных изобретателей: телефона — Александра Грэхема Белла, фонографа — Т. А. Эдисона, микрофона — Давида Эджвуда Юза.

Как уже указывалось выше, американцы предпочитали импортировать идеи из Европы. Но растущее значение науки заставило и Соединённые Штаты обзавестись «такой роскошью, как класс учёных, могущих соперничать с учёными Старого Света» (Лависс и Рамбо). К 1900 г. Америка имела 38 университетов, из которых 24 возникли во второй половине века, в том

числе такие ведущие в дальнейшем университеты, как Калифорнийский (1873), Джона Гопкинса в Балтиморе (1876), Колумбийский в Нью-Йорке (реорганизован в 1890 г.), Корнельский (1865), университет в Чикаго (1857—1892) и ряд других.

К этому списку прибавляется 11 колледжей и 4 технические школы. Около 110 физиков работало в этих учреждениях. Из них мировую известность получил теоретик Д. В. Гиббс; широко известны экспериментаторы: А. А. Майкельсон, Э. В. Морлей, Дайтон-Миллер, Г. А. Роуланд и в то время только начавшие свою научную карьеру Р. Вуд и Р. Милликэн.

В 1868 г. открылся Токийский университет в Японии, в 1897 г. университет в Киото. Из восьми физиков, работавших в этих университетах в 1900 г., получил известность своими исследованиями по магнетизму Нагаока.

Китай в 1900 г. ещё не имел своего университета и высших технических школ.

В других странах Европы и Америки дело обстояло следующим образом: Испания имела 5 университетов и 2 технических учебных заведения (в Мадриде), в которых работали 13 физиков, Португалия — 1 университет и 2 технические школы, обслуживаемые восемью физиками, Греция — 1 университет, Сербия — 1 высшую школу в Белграде, в которой работали 3 физика. 2 физика работали в высшей школе в Софии (Болгария). Румыния имела 2 университета, в которых работали 5 физиков. В Южной Америке 2 университета имела Аргентина, в которых работали 4 физика, 1 университет был в Перу, 1 в Уругвае. В Бразилии была политехническая школа, в Чили педагогический институт.

Из азиатских стран, кроме упоминавшихся выше, был университет на Филиппинах, колледж в Бирме. В Африке была высшая школа в Каире (без естественных факультетов), университет в Капштадте, академия в Алжире.

Так выглядела «география науки» в конце XIX столетия. В. Вин, оценивая в 1918 г., т. е. после первой мировой войны, итоги соперничества в области науки и техники между отдельными странами, говорил:

«Настоящее соревнование возможно только между Германией, Англией и Соединёнными Штатами. Тогда как успехи физики в Англии должны быть поставлены на первом месте, техника в этой промышленной стране не развивалась очень быстро. Особенно английская электротехника не выдерживает никакого сравнения с немецкой. Как раз наоборот дело обстоит в Соединённых Штатах. Расцвет физики в Америке ничем особенным не проявился, между тем американской технике и в особенности электротехнике удалось занять первенствующее положение в некоторых областях».

Вин ничего не говорит о России, зажатой в кольцо блокады, которую осаждали армии хорошо вооружённых передовой военной техникой интервентов. Ему и в голову не приходила мысль о возможных будущих успехах русской науки, бурный прогресс которой на основе передового общественного строя представляет собой событие исключительной важности в истории науки XX века.

В России со времён Ломоносова развивалась крепкая научная традиция, проявившая себя с большой силой в период подъёма русского естествознания после падения крепостного права. Этот подъём представляет собой одну из замечательных страниц истории науки конца XIX столетия и заслуживает отдельного рассмотрения.

ФИЗИКА В РОССИИ В КОНЦЕ XIX ВЕКА

Подъем
русской науки
в пореформенную
эпоху.

Имелись важные внешние и внутренние обстоятельства, вызвавшие огромный подъем русского естествознания в эпоху после падения крепостного права в России. В результате этого подъема русская наука внесла в развитие мировой науки фундаментальный вклад, кото-

рый в ряде случаев предопределил судьбу развития той или иной научной области. Причина этого кроется прежде всего в специфической обстановке, сложившейся в России к 60-м годам.

Крымская война показала полную экономическую и культурную отсталость феодально-крепостнического строя дореформенной России. Напуганное ростом восстаний крестьян против помещичьего гнета, царское правительство оказалось вынужденным отменить крепостное право и тем самым разорвать путы, сковавшие развитие капитализма в России. После падения крепостного права развитие промышленности в России пошло быстрыми темпами. Приводимой ниже таблицей иллюстрируется рост добычи чугуна и угля с 1867 по 1902 г.

Таблица 1

Средняя ежегодная добыча угля и выплавка
чугуна в России

Годы	Ежегодная добыча угля в млн. пудов	Ежегодная вы- плавка чугуна в тыс. пудов
1867—1877	8,34	0,76
1877—1887	16,67	1,28
1887—1897	40,71	7,74
1897—1902	64,46	8,77

Рост добычи угля и чугуна был связан с ростом потребления угля и металла в промышленности и на транспорте.

В. И. Ленин в книге «Развитие капитализма в России» указывал, что «с 1865 по 1875 г. средний годовой прирост русской железнодорожной сети составлял 1½ тыс. километров, а с 1893 по 1897 г. около 2½ тыс. километров»¹.

В этот же период росло оснащение промышленности паровой двигательной силой. Этот рост характеризуется следующими цифрами:

¹ В. И. Ленин, Соч., т. 3, стр. 486.

Годы	Число паровых котлов	Число паровых машин	Общая мощность паровых машин в л. с.
1875—1878	8 510	6 354	114 977
1892	14 248	13 075	345 209

Таким образом, за 16 лет общая мощность паровых машин увеличилась втрое, а средняя мощность двигателя возросла с 18 л. с. до 26 л. с.

С ростом капиталистического производства рос и русский рабочий класс. В цитированной нами книге Ленина этот рост характеризуется следующей таблицей:

Таблица 2

Число рабочих в крупных капиталистических предприятиях
(в тыс.)¹

Годы	В фабр.-зав. промышленности	В горной промышленности	На железн. дорогах	Всего
1865	509	165	32	706
1890	840	340	252	1432

Этот рост русского пролетариата имел всемирно-историческое значение. Ещё в 1894 г., т. е. в описываемую нами эпоху, Ленин писал, что когда передовые представители русского рабочего класса усвоят идеи научного социализма, идею об исторической роли русского рабочего и на основе прочной организации преобразуют разрозненную экономическую борьбу в сознательную классовую борьбу, тогда, указывал Ленин, «Русский рабочий, поднявшись во главе всех демократических элементов, свалит абсолютизм и поведет русский пролетариат (рядом с пролетариатом всех стран) прямой дорогой открытой политической борьбы к победоносной коммунистической революции»².

В такой исторической обстановке происходило развитие общественного сознания в России в период после падения крепостного права. Это развитие получило огромный импульс в рассматриваемую эпоху. Достаточно указать, что именно в этот период произошла эволюция в русской общественной мысли от Чернышевского к Плеханову и затем к великому Ленину. Подъем происходил во всех сферах общественного сознания — в литературе, искусстве, науке. В 1866—1869 гг. печаталась грандиозная эпопея Л. Толстого «Война и мир», в 1898 г. вышел первый сборник рассказов Максима Горького.

О подъеме русского искусства В. В. Стасов писал, что «новый живописец чувствовал потребность и призвание идти заодно с остальным обществом» и что это ярко доказывается той массой картин, которая стала появляться со времени нового царствования (т. е. царствования Александра II), тот-
2

¹ В. И. Ленин, Соч., т. 3, стр. 436.

² В. И. Ленин, Соч., т. 1, стр. 282.

час после окончания крымской войны. Стасов указывал, что «это всё были картины с новым содержанием и настроением. Ни в один прежний период не было подобной массы художественных созданий»¹.

Характерной чертой пореформенного русского искусства, как указывал Стасов, был «реализм и национальность». Реализм русского искусства был глубоко демократическим, кровно связанным с народом. Он был воспитан такими учителями и «колонновожатыми» (по выражению Стасова), как Белинский, Добролюбов и Чернышевский. Глубокая национальность русского искусства обуславливалась и тем фактом, что масса новых русских художников пришла из глубины России.

В. В. Стасов писал:

«В совершенную противоположность предыдущим двум периодам (эти периоды Стасов называл «придворно-иноземным» и «профессорским и казённым») период, начинающийся с 50-х годов, заключает в себе художников, из которых замечательнейшие родились не в Петербурге, лишь немногие в Москве, а огромное большинство внутри России в разнообразнейших губерниях севера, юга, востока и запада».

Аналогичное положение имело место и в русской науке, которая в предыдущий период была представлена почти исключительно академией с её «если не всегда иноземным, то почти без исключения иноязычным составом», как об этом писал К. А. Тимирязев.

В противоположность этому виднейшие представители русского естествознания, обеспечившие его подъём в эту эпоху на высшую ступень, пришли в науку с разных концов русской земли: Сеченов с Поволжья, Менделеев из Тобольска, Бутлеров из Казани, Столетов из Владимира, Попов с Урала.

Эти лучшие сыны русского народа в борьбе с «противодействием тёмных сил, которые ревниво затворяют дверь Академии перед русскими талантами», обогатили науку открытиями мирового значения, сохранили и приумножили ломоносовские традиции в науке: её глубокую идейность, независимость и смелость мысли, её материализм, её демократический и патриотический характер. Вопреки ужасающим условиям работы русских учёных, вопреки противодействию реакции, русское естествознание стало могучим фактором научного прогресса. Оно в лице Сеченова и его ученика Павлова положило начало изучению высшей нервной деятельности и проложило пути в исследовании этой, казалось бы, недоступной для научного познания области. Тимирязев разгадал загадку зелёного листа и открыл путь к решению важнейшей проблемы фотосинтеза. Менделеев открытием периодического закона не только подвёл мощный теоретический фундамент под всё здание химической науки, но и дал руководящую нить к разгадке таинственных законов атомного мира.

Бутлеров произвёл переворот в органической химии открытием теории строения. Столетов своим исследованием фотоэффекта подготовил почву для квантовой теории, Попов открытием радио заложил основы новой могущественной отрасли техники. Это была подлинно передовая наука.

А. Г. Столетов. Одним из замечательных фактов, характеризующих эпоху подъёма естествознания в России, является рост значения и влияния Московского университета — этого старейшего университета в области точной науки и естествознания. В последние годы XIX столетия Московский университет по праву занимал ведущее положение в отечественной физике. Профессор Московского университета

¹ В. В. Стасов, Избр. соч., т. II, М., 1951, стр. 465.

Александр Григорьевич Столетов стал общепризнанным лидером русских физиков.

А. Г. Столетов родился 10 августа (н. ст.) 1839 г. в г. Владимире в купеческой семье. После окончания Владимирской гимназии Столетов поступил в 1856 г. на физико-математический факультет Московского университета. Физику в Московском университете в то время начинал читать сменивший М. Ф. Спасского Н. А. Любимов (1830—1897), с которым впоследст-



Рис. 177. В большой физической аудитории Московского университета. И. Ф. Усагин с подготовленными к демонстрации приборами

вии у А. Г. Столетова были серьёзные столкновения на принципиальной почве.

Н. А. Любимов был, несомненно, выдающимся преподавателем и прекрасно владел искусством демонстрационного эксперимента. Им были созданы в университете замечательные демонстрации, некоторые из них сохранили своё значение и до нашего времени. Н. А. Любимов был крупным историком физики, в вопросах которой он обладал высокой эрудицией. С большой симпатией Любимов относился к Декарту, взгляды которого на природу он разделял и пропагандировал. Все эти черты в преподавании Любимова несомненно оказали влияние на Столетова, ставшего впоследствии блестящим преподавателем. Воспитанник Любимова даровитый И. Ф. Усагин стал в дальнейшем неизменным помощником Столетова в его преподавательской и научной работе.

По окончании университета Столетов, по предложению Любимова, был оставлен при университете и направлен для подготовки к профессорскому званию за границу. Здесь обнаружилось глубокое различие в воспитании Любимова и Столетова. Студенческие годы Любимова проходили в обстановке жесточайшей николаевской реакции, и это нашло своё отра-

жение в его общественно-политических взглядах, которые были крайне реакционными (он принадлежал к известной группе Каткова).

Студенческие годы Столетова проходили в обстановке большого общественного подъёма, и это нашло своё отражение в передовом материалистическом и демократическом характере мировоззрения Столетова.

За границей Любимов работал и учился в 1857—1859 гг. у Реньо и находился под влиянием французской науки, которая к этому времени уже сдавала свои передовые позиции и уступала место своей счастливой сопернице Германии.

Столетов же был в заграничной командировке в Германии и был свидетелем того подъёма в области естественных наук в этой стране, который он сам так ярко описал в очерке, посвящённом своему учителю Кирхгофу. На глазах у Столетова совершался переход к новым методам обучения физики: он начал свою работу в первой физической лаборатории Магнуса, заканчивал её у Кирхгофа. Столетов имел возможность побывать и в Париже и наглядно сравнить преимущества и недостатки обеих физических школ: старой французской и новой немецкой. Столетов вернулся из командировки сложившимся учёным, проникнутым глубоким пониманием новых задач и требований физической науки, с ясно осознанной целью — привести преподавание и научную работу по физике в России в соответствие с этими новыми требованиями.

В Москве Столетову было поручено чтение курса математической физики. Уже во вступительной лекции, прочитанной им 17 сентября 1866 г. и посвящённой истории теории электричества, чувствуется ясность и зрелость мысли молодого физика. Сохранив историческую традицию Любимова и дав сжатый, но точный обзор теоретических обобщений в науке об электричестве, Столетов правильно характеризует тенденцию к единству физической картины мира, проявившейся в исключении многочисленных невесомых и утверждении закона сохранения энергии. Этот закон Столетов называет великим; утверждение этого закона, по Столетову, «составляет самый славный подвиг естествознания за последние 25 лет»¹.

Следует отметить, что Столетов отказывается от термина Гельмгольца «сила» и присоединяется к термину Ранкина «энергия». Даже в этом факте ясно чувствуется стремление Столетова к новому. Но особенно важно то, что, подойдя к современному положению в науке об электричестве, Столетов (в этом ярко проявляется самостоятельность его мышления) не присоединяется к сторонникам теории Вебера (а у Вебера он учился в заграничной командировке), а, наоборот, высказывает в его адрес ряд критических замечаний. Он обращает внимание слушателей на возможности новой максвелловской теории (автора этой теории он не называет), указывая на такие факты, как открытие Фарадеем магнитного вращения плоскости поляризации и совпадение скорости электрической волны, вычисленной на основе закона Вебера со скоростью света, определённой из опытов Физо. Но вместе с тем Столетов прозорливо указывает, что нет фактов, противоречащих гипотезе двух электрических жидкостей, и что достижения, сделанные на основе этой гипотезы, не могут потерять своего значения в будущей теории — они будут только выражены новым языком.

В заключение Столетов характеризует те направления, по которым идёт эволюция физических воззрений. Это прежде всего отмеченная уже выше тенденция к исключению невесомых, из которых в будущем «быть может» удержится только эфир. Во-вторых, стремление глубже раскрыть

¹ А. Г. Столетов, Собр. соч., т. I, стр. 21.

молекулярную природу физических процессов и, наконец, стремление к единому механическому миропониманию, ведущее своё начало от Ньютона, строками из предисловия к «Началам» которого Столетов и заканчивает свою замечательную по форме и содержанию лекцию.

Но Столетов не мог удовлетвориться только теоретическим обучением студентов физике. Он ведёт энергичную борьбу — и в этом отношении пользуется полной поддержкой Любимова — за организацию физической лаборатории в университете. Напряжённая борьба увенчалась успехом. С 1870 г. он вместе со своим учеником Н. Н. Шиллером готовит задачи нового физического практикума.

В дальнейшем Столетов ставит своей целью создание физического института, отвечающего современным запросам физической науки. Мы говорили уже об этой борьбе Столетова, в которой так ясно выразилось понимание Столетовым новых условий развития физической науки.

В 1869 г. Столетов защищает магистерскую диссертацию на тему «Общая задача электростатики и её приведение к простейшему случаю». Это была классическая задача тогдашней математической физики; её решением Столетов доказал, что он в совершенстве владеет современным ему математическим аппаратом. Через два года Столетов доказал, что он и первоклассный экспериментатор. В 1872 г. он защитил докторскую диссертацию — «Исследование о функции намагничивания мягкого железа». Это исследование было им выполнено в 1871 г.

Как мы уже видели, в диссертации Столетов разработал баллистический метод измерения магнитных свойств веществ на образцах, имеющих форму кольца. С тех пор этот метод стал классическим в практике магнитных измерений. Открытия Варбурга и Юинга, о которых мы упоминали выше, явились прямым продолжением исследования Столетова.

Сам Столетов с присущей ему прозорливостью подчёркивал значение магнитных исследований для практической электротехники. Вместе с тем Столетов этим исследованием положил начало большой работе русских физиков по укреплению и развитию теории Максвелла, завершившейся классическими опытами Лебедева и открытием Попова. Об этом у нас шла речь в четвёртой главе. Мы рассматривали также другие работы Столетова. Скажем ещё раз, что своими исследованиями Столетов содействовал укреплению и развитию электромагнитной теории света, атомной физики, т. е. именно тех основных направлений в физике, из которых возникла современная физика. Столетов хорошо понимал, что решение актуальных проблем новой физики требует новых средств и прежде всего ликвидации «ломоносовских» условий, в которых находилась физическая наука в России.

Следует отметить, что одним из неблагоприятных обстоятельств, крайне отрицательно отражавшихся на развитии науки в России, была возникшая ещё во времена Ломоносова рознь между русскими и иностранными учёными, работавшими в России, перешедшая в дальнейшем во вражду

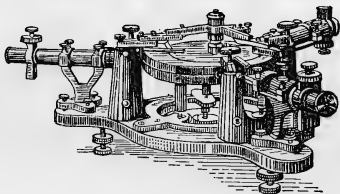


Рис. 178. Конденсатор Столетова

между наукой, представленной Петербургской академией наук, и наукой, развивающейся в университете, в первую очередь в Московском. Несколько выше мы уже касались этого вопроса, теперь остановимся на нём несколько подробнее.

В 1880 г. произошёл инцидент с академическими выборами Д. И. Менделеева. Кандидатура Менделеева была отклонена, а на его место был выбран химик Бельштейн. Этот инцидент вызвал бурю негодования в русской научной общественности. Известный химик акад. А. М. Бутлеров выступил в печати со статьёй «Русская или только императорская академия наук?» и группа профессоров Московского университета, в числе которых был и А. Г. Столетов, обратилась к Менделееву с письмом, в котором между прочим говорилось: «В последние годы Ваш закон *периодичности химических элементов*, столь блистательно оправданный открытием «предсказанных» Вами металлов, напоминающих открытие Нептуна, доставил Вам почётное место в кругу учёных всего мира... Дальнейшая экспериментальная разработка «закона Менделеева» без сомнения ещё более покажет, как широко обнимает он свойства вещества, и окончательно упрочит за Вами славу первоклассного учёного мыслителя. Между тем мы узнаём, что находящаяся в Санкт-Петербурге Академия наук при недавно происходивших выборах не приняла Вас в число действительных членов. Для людей, следивших за действиями учреждения, которое по своему уставу должно быть «первенствующим учёным сословием» в России, такое известие не было вполне неожиданным. История многих академических выборов с очевидностью показала, что в среде этого учреждения голос людей науки подавляется противодействием тёмных сил, которые ревниво затворяют двери Академии перед русскими талантами. Много раз слышали и читали мы о таких прискорбных явлениях в академической среде,— и говорили про себя: Quo usque tandem? Но пора сказать прямое слово, пора назвать недостойное недостойным. Во имя науки, во имя народного чувства, во имя справедливости мы считаем своим долгом выразить наше осуждение действию, несовместному с достоинством учёной корпорации и оскорбительному для русского общества»¹.

Когда Столетов участвовал в составлении этого письма, он и не подозревал, что и ему самому придётся испытать «противодействие тёмных сил», в результате которых последует крушение всех его планов по развитию физики в России и преждевременная смерть. Столетов хорошо понимал пагубное значение для отечественной науки раздора между академической и университетской наукой и стремился содействовать его ликвидации. В этом отношении большой интерес представляют хлопоты Столетова в целях привлечения акад. М. А. Рыкачёва к работе по организации метеорологической обсерватории при Московском университете. В письме М. А. Рыкачёву от 23 января 1892 г. Столетов пишет:

«Из письма Вашего не видно, чтобы великий князь, президент Академии, был прямо прот и в Вашего перемещения... (речь идёт о переводе М. А. Рыкачёва в Москву). В Москве же назрела потребность о р г а н и з о в а т ь дело для нас совершенно новое и со временем оказать достойную и существенную помощь той же главной физической обсерватории, открыв, так сказать, её отделение в центре России и готовя путём университетского преподавания новых и новых работников по излюбленной Вами науке»².

¹ А. К. Тимирязев, А. Г. Столетов, изд. МГУ, 1948, стр. 23—24.

² Архив АН СССР, ф. 328, оп. 2, № 499.

В этих строках весь Столетов с его думами о процветании отечественной науки, о развитии Московского университета.

Рыкачёв признавал важность соображений Столетова, но дело не состоялось, и один из возможных деловых контактов между Академией наук и университетом не был установлен.

Второй шаг, предпринятый Столетовым, имел ещё более радикальный характер. Столетов дал согласие на выдвижение своей кандидатуры на освободившуюся вакансию по физике. В Москве научная жизнь по физике благодаря энергии Столетова, была ключом. В письме Михельсону от 16/28 октября 1892 г. Столетов пишет:

«У нас все съехались и всё в полном ходу. Кн. Голицын написал и собирается печатать большую диссертацию, листов в 12. Лебедев всё лето работал в Москве и хвалится, что достиг хороших вещей по части Гертцовщины, — но пока ещё не делал сообщений. Премию Мошнина присудим на сей раз работе Кастерина (только что кончившего) об изменении капиллярных коэффициентов с температурой. Его и Грибоедова оставляем при университете по физике»¹.

Опять-таки в этих строчках проглядывает весь Столетов с его радостью успехам молодой русской физики. Растут её кадры, растут её достижения. Здесь упоминается в самых светлых тонах («всё в полном ходу») и Голицын с его диссертацией. Ничто не предвещает бури. Но вот на горизонте показываются тучки.

В письме 2/14 апреля 1893 г. Столетов пишет: «Диссертация кн. Голицына обширна и по темам интересна, но по внимательном изучении оказывается выполнена плохо...» В конце Столетов прибавляет: «Недельки через две, может быть, придётся сообщить Вам некую новость, — но пока ещё рано»².

И в следующем письме 20 апреля/2 мая 1893 г. Столетов рассказывает об этой новости:

«Обещанная мною новость — не то, о чём Вы думаете. Она сверх ожиданий не состоялась (подчёркнуто мной. — П. К.) и состоится ли в будущем — не знаю, но нет причины секретничать. 14 апреля была назначена моя баллотировка в ординарные академики Академии наук, она отложена на неопределённое время В. князем президентом, — как повествуют потому, что там только что разыгралась новая междоусобица (битва русских с немцами), которая могла бы отразиться на мне похмельем в чужом пиру. Я только что вернулся из трёхдневного отпуска в Петербург для разузнания, в чём дело.

Дело о моей кандидатуре (на вакансию покойного Гадолина) двинуто ещё зимою, и на первых порах обещало несомненный успех. Комиссия 1-го отделения Академии (Вильд, Бредихин, Чебышев, Бекетов и Бельштейн) единогласно подписала и внесла в отделение представление обо мне как единственном кандидате... В то время вечная борьба немцев с русскими была в затишьи, и мне предсказывали полный успех. Недавно же перегрызлись вновь...

Дело моё отложено до осени, и неизвестно, при каких условиях возобновится, и не придётся ли мне самому взять назад моё согласие на баллотировку.

4 августа с/г. я дослуживаю 30-летие, так что переход к тому времени в Петербург являлся особенно своевременным: получив полную пенсию

¹ Архив АН СССР, ф. 328, оп. 2, № 61.

² Там же.

здесь, я имел бы полное жалование там и надеялся остаток жизни провести без лекций (и особенно без экзаменов) и что-нибудь сделать для Академии, где кафедра физики остаётся без жизни со смерти Ленца (подчёркнуто мной.— П. К.). Видно, не судьба!

Диссертацию кн. Голицына мы с Соколовым забраковали...¹. В подчёркнутых нами последних словах Столетова заключены его планы о будущей работе. Покончив с тяжёлой педагогической нагрузкой в университете, Столетов мечтает целиком отдать свои силы заботам по развитию академической кафедры физики и, используя богатые возможности Академии, создать, наконец, физический институт, отвечающий современным требованиям. Этого не случилось.

Президент отвёл кандидатуру Столетова и на его место был выбран Голицын, история с диссертацией которого оказалась таким роковым образом переплетённой с историей несостоявшихся академических выборов Столетова. Тем самым молодой русской физике был нанесён тяжёлый удар, она на долгие годы лишилась организующего центра.

Б. Б. Голицын, много сделавший впоследствии для развития отечественной сейсмологии и внесший ценный вклад в физику своими личными работами, не мог сделать для создания академического физического института того, что хотел сделать Столетов. Академическая кафедра физики осталась без жизни со смерти Ленца до А. Ф. Иоффе и П. П. Лазарева.

Второй тяжёлый удар русской физике был нанесён в 1911 г., когда Кассо разгромом Московского университета обрёк на прозябание только что созданный физический институт университета, разгромил новый центр физической науки в России — школу П. Н. Лебедева — и ускорил смерть этого славного представителя русской физики. Зато пышным цветом расцвели семена раздора, посеянные в год академических выборов Столетова.

Мы не будем более возвращаться к этой печальной странице истории нашей науки. Она показывает, в каких условиях приходилось работать русским учёным, и глубоко прав был Лебедев, когда писал в статье, посвящённой памяти Ломоносова, что всё, что у нас делается в науке, делается не благодаря существующим в России условиям, а вопреки им.

Вопреки этим условиям Столетову удалось организовать кадры физиков в России. Его ученики работали в Москве, на Украине, в Казани, в Польше. Его советов и помощи спрашивал П. Бахметьев, работавший физиком в Софии. Ни одна диссертация по физике не проходила мимо Столетова. Он был общепризнанным главой русской физики, её представителем за рубежом. Он пользовался большим уважением со стороны ведущих физиков мира, что нашло своё выражение, помимо других внешних признаков внимания, в факте избрания Столетова вице-президентом Международного конгресса электриков.

«Я испытываю высокое уважение как по отношению к Вашим исключительно выдающимся научным трудам, так и по отношению к личным качествам Вашего характера»², — писал Столетову Больцман. В истории русской науки имя Столетова вписано золотыми буквами не только в связи с его личным вкладом в науку, но и в связи со всей его неутомимой деятельностью по развитию физики в России, которой он отдал свою жизнь.

Деятельность Столетова началась и закончилась в последнее тридцатилетие XIX в. (Столетов умер 15 мая 1896 г.). В 1900 г. в Московском университете работали в области физики Николай Алексеевич Умов, Алексей

¹ Архив АН СССР, ф. 328, оп. 2, № 61.

² А. К. Тимирязев, А. Г. Столетов, стр. 28.

Петрович Соколов, Пётр Николаевич Лебедев, Николай Петрович Кас-терин.

Так выросли кадры физиков с момента начала деятельности Столе-това (70-е годы). Если Столетову приходилось читать самому курс физи-ческой географии, то теперь курс метеорологии и физической географии читал специалист геофизики Эрнест Егорович Лейст. В университете была создана термическая лаборатория Владимиром Фёдоровичем Лугининым. Механику читал ученик Столетова Николай Егорович Жуковский. Это был сильный коллектив учёных, способный развивать науку.

Особенно плодотворной была деятельность П. Н. Лебедева, который не только обогащал науку своими трудами, но воспитывал и спланивал, продолжая дело Столетова, молодых физиков. Так сложилась известная в истории нашей науки школа Лебедева.

Итак, продолжателем дела А. Г. Столетова в Москов-ском университете был Пётр Николаевич Лебедев. Ему завещал Столетов свои последние мысли о разви-тии науки в России, о развитии Московской лабора-тории. Об этом рассказывает сам Лебедев в своих

Деятельность
П. Н. Лебедева
в Московском
университете.

воспоминаниях о Столетове:

«Судьба судила мне часто видеть его в последние дни болезни. Несмотря на увеличивающуюся слабость, мысль его продолжала работать с особен-ной свойственной ему ясностью, речь отличалась обычной тонкостью и изя-ществом, и он, как бы предчувствуя близкую кончину, точно торопился высказать все то, что ему было дорого, и с особенной охотой делал как бы обзоры современного состояния наших знаний и указывал воз-можность их дальнейшего развития или беседовал о нуждах нашей лабо-ратории.

Последний раз я его видел за день перед кончиной; он был настолько слаб, что попытался, но уже не мог протянуть мне руки — воспаление рас-пространилось на левое лёгкое, и силы изменили ему. Тем не менее он за-ставил меня рассказать о моих занятиях за последний день и навёл разго-вор на любимую тему о газовых разрядах. Он сам говорил мало, но потом оживился и слабым, чуть слышным голосом, с большими перерывами стал говорить о значении подобных исследований. Прощаясь со мной, он слабо пожал мне руку и чуть слышно добавил: «Советую заняться этими вопро-сами — они очень интересны и очень важны». Это были последние слова, которые я от него слышал»¹.

Столетов был инициатором приглашения Лебедева в Московский уни-верситет. Вместе с А. П. Соколовым он ходатайствовал перед Советом фи-зико-математического факультета 25 сентября 1891 г. о том, чтобы фа-культет назначил третьим лаборантом «доцента Страсбургского универси-тета Петра Николаевича Лебедева, человека весьма энергичного и хорошо знакомого с практикой дела»².

Принимая это скромное место, Лебедев имел в виду прежде всего воз-можность осуществления своих научных замыслов, для чего в Страсбурге не было условий. «Может быть, виною была некоторая придиричивость Кундта, даже жаловавшегося на слишком богатую фантазию Лебедева», — предполагал К. А. Тимирязев³. В Москве Лебедев, как указывал Тимирязев, «найдя в Столетове искреннее сочувствие и опору... мог всецело от-

¹ П. Н. Лебедев, Собр. соч., стр. 285—286.

² Архив МГУ, дело № 60, лист 16, за 1891 г.

³ К. А. Тимирязев, Наука и демократия, М., 1920, стр. 61.

даться своему истинному призванию — экспериментальному исследованию, не отвлекаясь побочными тяжёлыми обязанностями преподавателя...»¹. О своих научных планах в Москве Лебедев писал в своих дневниках:

«На что обратить внимание, за что приняться приехав в Москву?

а) Заняться вопросами механического действия резонаторов: это экспериментально и математически может повести к любопытным результатам. Трудности значительные, и результаты пока нельзя применить

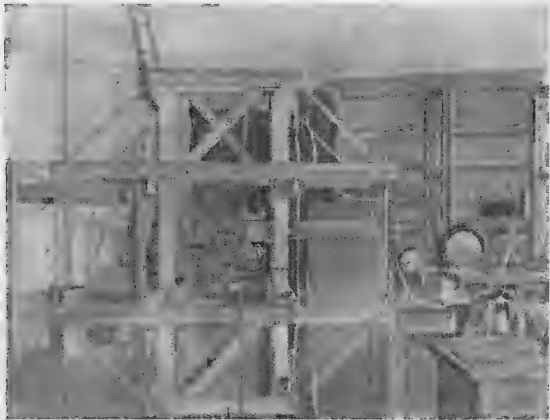


Рис. 179. Уголок лаборатории П. Н. Лебедева

к главному вопросу — к объяснению молекулярных сил, так как нет необходимых данных. Ещё усложняющим фактом является то обстоятельство, что размеры молекул очень незначительны с длиной волны, а в звуковых резонаторах это не так.

б) Богаче экспериментально вопрос об электрических спектрах проводников»².

Следующая запись дневника от 10 июня 1891 г. гласит:

«Пожалуй, самое рациональное, приехав в Россию, готовиться на магистра и весной держать математику, для прикрытия работая над измерением абс. напряжения звука. Засим летом готовиться на механику и физику, которые и держать зимой; если хватит время — заняться теоретически и экспериментально притяжением акустических и электрических резонаторов. А затем теория жидкостей и экспериментальная болометрическая спектроника»³.

¹ К. А. Тимирязев, Наука и демократия, стр. 61.

² Архив АН СССР, ф. 293, оп. 1, № 1, стр. 120—121.

³ Там же, стр. 122.

На следующих страницах дневника уже определённо вырисовываются планы научной работы Лебедева в Москве, складывающиеся из четырёх взаимосвязанных тем: 1) исследование сущности молекулярных сил, 2) отталкивательная сила Солнца, 3) механическое действие резонаторов, 4) световое давление. Эти планы и были осуществлены Петром Николаевичем при полной поддержке со стороны Столетова. Столетов увлекала связь этих тем с электромагнитной теорией света, «герцовщиной», по его выражению, и он с большим интересом следит за успехами Лебедева. В его корреспонденции то и дело проскальзывают упоминания о лебедевских работах:

«Лебедев готовит интересную, кажется, работу по герцовской части».

(Письмо Михельсону от 23 марта 1892 г.)

«Вскоре будут продолжения магистерских экзаменов Ульянина и Преображенского и начало таковых — Лебедева. Сей всё лето проработал над притяжением и отталкиванием вибрирующих тел и говорит, что получил очень красивые результаты».

(Письмо Михельсону от 24 сентября 1892 г.)

«Лебедев всё лето работал в Москве и хвалится, что достиг хороших вещей по части герцовщины, но пока ещё не делал сообщений».

(Письмо Михельсону от 16 октября 1892 г.)¹.

В письме Михельсону от 12/4 1894 г. А. Г. Столетов, сообщая об успехе руководимой им физической секции IX Всероссийского съезда естествоиспытателей и врачей писал:

«Особенно отличился Лебедев; его длинная лекция по опытам Герца была мастерски сказана и обставлена...². Когда Лебедев закончил свою первую крупную научную работу в Москве «О двойном преломлении лучей электрической силы», то Столетов весной 1895 г. сделал в Киеве на заседании Физико-математического общества доклад об этой классической работе. В ответ киевские физики избрали А. Г. Столетова почётным членом Киевского физико-математического общества, «как выдающегося представителя науки и как основателя обширной школы русских физиков»³.

Сохранились записки Столетова, свидетельствующие о его постоянном внимании к работам Лебедева. В открытке, адресованной Лебедеву от 16 декабря 1895 г., Столетов озабоченно спрашивает:

«Что это вы исчезли? Не опять ли сокрушены инфлуэнцией или «световым давлением»? (Архив АН СССР, ф. 293, оп. 3, № 3, л. 19.)

Эта открытка свидетельствует, что в это время Лебедев работал над световым давлением. Другие записки говорят о работах Лебедева над рентгеновскими лучами. Открытие Рентгена весьма заинтересовало Лебедева, и уже 29 января 1896 г. он прочитал в университете публичную лекцию «Об открытых Рентгеном X-лучах», иллюстрируя её своими рентгенограммами, бывшими одними из первых рентгенограмм, полученными в России. Лебедев хорошо понимал, что прогресс в рентгенологии достигается «не от бесчисленного повторения снимков имеющимися под руками приборами, а от систематического исследования самого явления», и уделял большое внимание этому исследованию. Об этом свидетельствуют, между прочим, и записки Столетова:

¹ Архив АН СССР, ф. 328, оп. 2, № 61.

² Там же.

³ Г. М. Тепляков, А. Г. Столетов — основатель Московской школы физиков, Учёные записки ТГПИ, вып. VIII, 1955, стр. 61.

«Посылаю целый воз алюминия, но едва ли в пользу. В особых коробочках — медаль из алюминия и жетон 1881 (тонкий); ручку можно отпаять, если есть надежда пронять лучами. А. Ст.»¹.

«Посылаю только что полученную Revue. Здесь статья Poincaré (не думает, что это ультраф. лучи) и заметка Perrin'a (не безинтересна, — отражение совсем не удалось, и интерференция тоже); кроме этого, рисунки посмотрите дома. А. Ст.»².

Видно, что речь идёт о загадочной природе лучей. Сам Лебедев склоняется к волновой гипотезе: «Предположение, что X-лучи суть лучи ультра — ультрафиолетовые... является... весьма возможной гипотезой».

Первый «Столетовский» период деятельности П. Н. Лебедева в Московском университете заканчивается чтением им 11 марта 1896 г. пробной лекции на звание приват-доцента, на тему «О явлении электрического резонанса».

Лекция была одобрена Советом факультета, и Лебедев получил право читать самостоятельный курс. В этот период Лебедевым была выполнена и опубликована первая часть его исследования «О механическом действии волн на неподвижные резонаторы. Электромагнитные волны» (1894), выполнено и опубликовано исследование «О двойном преломлении лучей электрической силы» (1895). Кроме того, им были прочитаны доклады: «Об отталкивательной силе лучеиспускающих тел» (опубликован в 1891 г.), «О движении звёзд по спектроскопическим исследованиям» (опубликован в 1892 г.), «Август Кундт» (опубликован в 1894 г.), написана заметка: «Прибор для проложения звуковых колебаний» (1894).

Педагогическая деятельность Лебедева в этот период сводилась к руководству практическими занятиями студентов в физической лаборатории. И эти занятия Лебедев связывал с наукой, именно здесь в лаборатории формировались кадры будущей знаменитой школы Лебедева; даваемые Лебедевым студентам темы работ связывались с его собственными научными планами. В самом начале своей работы в университете он даёт студенту Щегляеву «проследить кундтову кривую дисперсию, для мест поглощения, пользуясь для этого фотографией». На таких темах воспитывались его будущие сотрудники и ученики. В 1892 г. в лаборатории работали оставленные при университете Кастерин, Грибоедов, Смирнов. Н. П. К а с т е р и н, открывший дисперсию звука, стал позднее сотрудником Лебедева и его помощником. В 1894—1896 гг. в лаборатории работали П. Б. Лейберг и В. С. Щегляев. Работа П. Б. Лейберга (1869—1938) о затухании акустических резонаторов была связана с работой Лебедева о пондеромоторном действии волн на резонаторы. Эта работа была выполнена в 1896 г. и явилась таким образом первой работой лебедевской школы. Лебедев так характеризует содержание исследования Лейберга о затухании резонаторов.

«Важный вопрос о декрементах затухания этих (собственных. — П. К.) колебаний, которыми определяется сила отзывчивости резонатора в области его резонанса, — этот вопрос был впервые поставлен и решён в работе П. Б. Лейберга (1896); неизменный по высоте и силе звук, идущий от непрерывно звучащего электромагнитного камертона, падал на резонатор; к слуховой трубке резонатора был прикреплён вибрирующий манометр М. Вина, которым и измерялось возбуждение (отклик) резонатора на звук данной высоты. Резонаторы были раздвижные, что позволяло, не изменяя отверстия резонатора и его расстояния от камертона, измерять

¹ Архив АН СССР, ф. 293, оп. 3, № 3, л. 26.

² Там же, л. 30.

высоту его собственного тона; раздвигая резонатор, легко убедиться, что возбуждение его постепенно растёт, приближаясь к полному резонансу с источником звука, а затем падает»¹. Из этих данных вычерчивалась кривая резонанса; отмечая интервал, «на который надо расстроить резонатор, чтобы возбуждение его упало на половину его возбуждения при полном резонансе с источником, легко вычислить величину декремента затухания». В 1895 г. Лебедев дал А. Р. Колли (1874—1918) — сыну Р. А. Колли — тему по дисперсии электромагнитных волн. Он поручил Колли исследовать показатель преломления воды в интервале волн от 20 см до 70 см. Работа эта была связана с исследованием Лебедева о двойном преломлении лучей электрической силы. Из этого исследования развилась замечательная работа А. Р. Колли об аномальной дисперсии электромагнитных волн, за которую он получил степень доктора, минуя магистра. Таким образом, П. Н. Лебедев явился продолжателем Столетова в области подготовки научных кадров по физике и создателем своей школы физиков. Таков был замечательный итог первого периода деятельности Лебедева в Москве.

«Но умер Столетов, и молодому учёному пришлось выдержать иную незнакомую ему борьбу, — с людьми, с их интригами»². В тяжёлых условиях пришлось нести Лебедеву знамя русской физики после смерти Столетова. Лебедеву не давали ни курса для физиков, ни помещения для лаборатории. Вскоре после смерти Столетова встал вопрос о замещении его курсов. Н. А. Умов обратился к Лебедеву с письмом, самый факт которого показывает, что Лебедева нельзя было уже обойти при обсуждении вопроса о преемнике Столетова, хотя Лебедев ещё не имел даже русской магистерской степени. Лебедев ответил Умову в высшей степени замечательным письмом, ярко рисующим скромность и высокое чувство ответственности молодого учёного. Лебедев благодарит Умова «за лестное приглашение высказать моё мнение относительно замещения лекций А. Г.». Он заявляет о своём понимании высокой ответственности, «которую берёт на себя доцент, читающий такой курс», и вместе с тем заявляет, что любит это дело и верит «в его огромное значение».

«Все сводится к тому, продумал ли я физику и прочувствовал ли её».

«Это, конечно, можно увидеть только из работ, да из показаний собственной совести. Работы мои вы знаете, а также и те мысли, которые руководят мною при исследовании пондеромоторных сил волн. Что касается до знаний моих, то общий курс я знаю и с формальной стороны; меня, конечно, не затруднит ни одна из лекций курса; читал я много, хотя, конечно, неравномерно и главным образом по отделам, лично меня интересовавшим, почему основательно продумал и прочувствовал я не всю физику, а только отдельные части её, т. е. изучил их так, что знаю, в каком направлении надо их развивать дальше; знаю, чего в них действительно не хватает; узнать всю физику в таких размерах вряд ли возможно для обыкновенного человека.

Насколько легко я решаюсь на самые смелые исследования, сознательно рискуя годами работы и здоровьем, настолько я смущаюсь перед доверившимися мне слушателями, так как ясно представляю себе всю ответственность и невозможность с первого раза, в качестве новичка, прочесть абсолютно законченный курс; меня страшит только мысль, что за эти недочеты слушатели не полюбят самый предмет, как я его люблю: к закоп-

¹ П. Н. Лебедев, Собр. соч., стр. 349—350.

² К. А. Тимирязев, Наука и демократия, стр. 55.

ценности и логичности лекций я предъявляю, может быть, чрезмерные требования.

Во всяком случае я был бы вполне счастлив, если бы мне поручили подобный курс, и, конечно, приложил бы все свои силы, чтобы удовлетворить самым высоким требованиям. Я могу сказать, положив руку на сердце, что после трёх лет я буду читать действительно хороший курс; но доказать, что я в первый год не сделаю промахов,— это я считаю невозможным; во всяком случае я на первый год стал бы возможно близко придерживаться текста уже читанного курса¹.

Это действительно самокритичное письмо имело следствием то, что Лебедев до самой смерти не читал курса экспериментальной физики на математическом отделении. Ему поручен был курс на медицинском факультете, а позднее на естественном отделении. Для физиков Лебедев читал специальный факультативный курс — «Задачи современной физики». Этот курс, по замыслу Лебедева, должен дополнить общий курс экспериментальной физики в двух направлениях: «во-первых, коснуться тех вопросов, которые стоят на рубеже нашего знания и представляют первые попытки проникнуть в область неизвестного... во-вторых, ... показать, ... как создаётся наука, ... как и какими задачами можно задаваться и как следует приступить к ним, чтобы труд не был напрасным».

Главную задачу этого курса Лебедев видел в том, чтобы «разрушить... представление, что вся наука уже окончена и заключена в книжках, что выдумали её какие-то незримые гиганты...» Курс должен указать слушателям «путь к производительному самостоятельному творческому мышлению». Лебедев учит читать журнальную и научную литературу критически: «не бойтесь думать, что этот или другой приём автора можно изменить и что можно вести его работу дальше»,

«Читать только для того, чтобы знать, что написано, — бесполезное занятие: мой книжный шкаф «знает» несравненно больше меня, «знает» всё обстоятельно и наверняка — но всё-таки про него нельзя сказать, что он физик»².

Лебедев учил своих слушателей творческому подходу к науке, и этот метод давал исключительные результаты. В его исследования втягивалось всё большее и большее количество участников.

Закончив в 1897 г. третью часть своего исследования «О пондеромоторном действии волн на резонаторы» и получив за эту работу степень доктора, минуя магистра (в 1899 г.), Лебедев вплотную занимается вопросами давления света. Это исследование разрастается в обширную проблему давления волн: водяных и акустических. В лаборатории Лебедева впервые в России начинаются исследования ультразвуков. С акустическими волнами работают Н. П. К а с т е р и н (1869—1947), доказавший в 1901 г. независимость от Релея существование акустического давления, В. Я. А л ь т б е р г (1877—1942), экспериментально доказавший существование звукового давления, В. Д. З е р н о в (1878—1938), работавший над темой «Абсолютное измерение силы звука», Н. Н. З л а т о в р а т с к и й (1877—1920), начавший исследование ультразвуков, и ряд других физиков.

Давление волн, распространяющихся на поверхности воды, измерил Н. А. Капцов, тогда студент, а ныне профессор МГУ. Всё шире и шире становится круг лебедевской школы: В. И. Романов (1880—1955) работает над поглощением электромагнитных волн, А. К. Тимирязев (1880—

¹ «Научное наследство», т. 1, АН СССР, 1948, стр. 566—567.

² Архив АН СССР, ф. 293, оп. 1, № 63.

1955) исследует внутреннее трение в разреженных газах и вопрос о связи скольжения с температурным скачком у стенки. Скачок температуры на границе твёрдого тела с газом изучает П. П. Лазарев (1878—1942), впоследствии академик, возглавивший после смерти Лебедева руководство группой московских физиков, из которой вышли такие известные советские учёные, как академики: С. И. Вавилов, Г. С. Ландсберг, В. В. Шулейкин, Г. А. Гамбурцев, П. А. Ребиндер, профессора: А. С. Предводителев, С. В. Кравков, Э. В. Шпольский, П. Н. Беликов, С. Н. Ржевкин и многие другие. Из школы Лебедева вышел и крупный советский магнитолог, член-корр. АН СССР В. К. Аркадьев (1884—1953).

Плодотворная, исключительно важная для русской науки деятельность Лебедева была прервана реакцией.

«Волна столыпинского «успокоения» докатилась до Московского университета и унесла Лебедева на вечный покой», — писал К. А. Тимирязев, потрёпанный вестью о безвременной смерти Лебедева (1 марта 1912 г.). Смерти Лебедева предшествовал разгром Московского университета, когда в 1911 г. ряд профессоров, в том числе и Лебедев, в знак протеста против реакционных мер министра просвещения, покинули университет. Русская научная общественность по справедливости оценила позорный акт самодержавия. На заседании 8 марта 1911 г. физическое отделение Русского физико-химического общества приняло следующее постановление:

Физическое отделение Русского физико-химического общества не может обойти молчанием тяжёлый кризис, постигший Физический институт Московского университета.

Этот кризис прерывает научную деятельность учёных, исследования которых заняли выдающееся место в научной системе современной физики. Теоретическое значение этих исследований и то искусство, с которым едва уловимые эффекты подверглись точному измерению, нашли достойную оценку во всемирной физической литературе.

Всякий, кому дорого развитие физики в России, с чувством глубокого удовлетворения следил за тем, как в Москве росла и развивалась образцовая школа физиков. Эта школа успела дать другим университетам профессоров, которые продолжают насаждать наилучшие педагогические традиции и вызывать научную инициативу. Московская школа представляет собой жизнеспособный, развивающийся организм, объединивший в одно целое основное преподавание — в общих курсах и в практических занятиях, широкое его развитие — в спектральных курсах приват-доцентов, наконец, введение в область самостоятельных исследований и подготовку к преподавательской деятельности — в лаборатории и семинарии. В последнее время появились новые признаки дальнейшего расширения поля исследований Московской школы. Среди разнообразных вопросов, разработка которых находилась на полном ходу, намечалась определённая группа работ из области, пограничной с физиологией и химией.

Посреди всей этой напряжённой деятельности и разразился настоящий кризис. Мы не можем примириться с мыслью, что старейший русский университет лишается такой исключительной по своему значению школы физиков, и надеемся, что настанет время, когда её представители снова возвратятся в стены Физического института Московского университета».¹

Это время наступило после Великой Октябрьской социалистической революции.

¹ ЖРФХО, ч. физическая, XIII, вып. 4, 1911, стр. 206.



Н. А. УМОВ

Н. А. Умов. Двумя годами позже Лебедева в Москов-

ском университете появился Умов. Николай Алексеевич Умов родился 28 января ст. ст. 1846 г. в семье симбирского врача. Позднее, когда дети подросли, отец переселился в Москву и дети учились в I Московской гимназии. После окончания гимназии в 1863 г. Умов поступил в Московский университет. Курс общей физики он слушал у Любимова и, вероятно, от него воспринял симпатию к идеям Декарта. Математическую физику Умов слушал у А. Г. Столетова, курс лекций которого он издал в литографированном виде. В следующем 1867 г. он окончил курс кандидатом и был оставлен при университете.

С 1868 г. он работает преподавателем физики во II женской гимназии, читает физику на Лубяньских

женских курсах, ведёт культурно-просветительную работу на селе.

В следующем 1869 г. он является одним из учредителей Общества распространения технических знаний, в работе которого он принимает самое активное участие до своего переезда в Одессу в 1871 г.

В 1870 г. Умов сделал сообщение в Математическом обществе, а затем напечатал выполненную им ещё в 1869 г. теоретическую работу «Законы колебаний в неограниченной среде постоянной упругости». В этой работе Умов проявил себя как выдающийся теоретик. Используя метод криволинейных координат Ламэ, он получил в этой работе ряд важных выводов, относящихся к распространению поперечных и продольных волн в среде. Эти выводы он распространил и на теорию световых волн. При этом оказалось, что полученные им уравнения совпадают с теми, которые получил в 1868 г. французский физик Буссинеск в работе «Новая теория световых волн».

В том же 1870 г., когда Умов сделал сообщение и напечатал эту работу, он сдал магистерский экзамен, а в следующем 1871 г. защитил магистерскую диссертацию «Теория термомеханических явлений в твёрдых упругих телах». Цель этого исследования Умов характеризует следующим образом:

«Нам кажется, что в настоящую минуту теоретическая разработка явлений упругости и теплопроводности подвинулась достаточно, чтобы набросать теорию, которая, исходя из начала сохранения энергии, подведет бы под одно общее учение явления теплопроводности и упругости в твёрдых телах»¹.

Таким образом, эта работа носит пионерский характер; в ней Умов синтезирует методы математической теории упругости и теории тепла, вводит в науку важное понятие «тепловых напряжений». В этом исследовании проявилось тонкое физическое чутьё Умова, философский размах, позволивший ему широко и смело использовать принцип сохранения энергии для объединения столь, казалось бы, различных ветвей естествознания, и выда-

¹ Н. А. Умов, Избр. соч., Гостехиздат, 1952, стр. 74.

ющиеся математические способности. Этими чертами характеризуется стиль почти всех научных работ Н. А. Умова.

Профессор Одесского университета Ф. Н. Шведов, представляя физико-математическому факультету этого университета кандидатуру Умова на должность доцента, так отзывался об этой работе:

«Цель этого сочинения — связать теорию упругости с механической теорией тепла. Не ограничиваясь исследованием частных случаев одинаковой температуры и одинаковых нормальных давлений и натяжений во всём теле, чем уже занимались Томсон, Клаузиус и Цейнер, г. Умов взглянул на вопрос с возможно общей точки зрения; когда температура неравномерно распространена во всём теле и последнее испытывает различные давления и натяжения в разных частях. В этом случае вопрос особенно усложняется, так как вследствие теплопроводности температура различных точек тела изменяется вместе со временем и г. Умову пришлось бы иметь дело разом с двумя теориями — упругости и теплопроводности, если бы он не пришёл к счастливой мысли: связать эти теории одним общим принципом. Для этого ему послужил известный принцип сохранения энергии. Как критериум основательности и общности исследований г. Умова может служить то обстоятельство, что из его уравнений вытекают как частные случаи: 2-й закон механической теории теплоты, уравнения равновесия твёрдых упругих тел и уравнение теплопроводности»¹.

Эта работа Умова была изложена им в духе классических теорий континуума, о котором мы говорили во второй главе. Сам Умов указывает: «Мы старались, по возможности, избегать гипотетических оснований, и те из них, которые нами допущены, положили уже в основы существующих теорий теплопроводности и упругости». Из теории теплопроводности Умов заимствует понятие теплового тока, под которым он понимает «количество тепла, протекающего через плоский элемент вследствие обмена тепла по линиям, соединяющим материальные частицы с той и другой стороны элемента и пересекающим его»². Это понятие и явилось зародышем будущего важного понятия, введённого Умовым, понятия потока энергии. Обозначая тепловой ток, протекающий за единицу времени через единицу площадки, нормаль к которой n , через q_n , Умов получает известное соотношение:

$$q_n = q_x \cos(nx) + q_y \cos(ny) + q_z \cos(nz),$$

указывающее на векторный характер теплового тока. Количество тепла, втекающее в единицу объёма за единицу времени, находится из известной интегральной теоремы Гаусса:

$$\oint q_n ds = \int \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) dv.$$

Величину $\text{div } \vec{q} = \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z}$ Умов обозначает через q . Тогда, прилагая первое начало термодинамики к элементу объёма, Умов получает уравнение:

$$\frac{q \, d\tau}{A} = \partial w + \psi(t) \delta J_t.$$

¹ А. И. Бачинский, Очерк жизни и трудов Николая Алексеевича Умова, 1916, стр. 14—15 (выписка из протоколов заседания Совета Новороссийского университета за 1871 г.).

² Н. А. Умов, Избр. соч., стр. 75—80.

Здесь δw означает «приращение в элементе живой силы незаметного молекулярного движения, называемого теплотой». Величина $\psi(t) \delta J_t$ называется «дисгрегационной работой» в элементе. «Это название, — указывает Умов, — мы даём работе, истрачиваемой теплотой при изменении расположения частиц в теле. При этом теплота должна преодолевать, с одной стороны, молекулярные силы, с другой — внешние силы и давления»¹.

Величина $d\tau$ обозначает бесконечно малый промежуток времени, в течение которого рассматривается процесс теплопередачи и теплового расширения элемента, A — термический эквивалент работы, величина δJ_t , где значок t указывает, что изменение происходит при постоянной температуре, является полным дифференциалом. Рассматривая элемент как независимый от остального тела и обозначая $q \cdot \delta\tau$ через δq , Умов получает из предыдущего выражения уравнение:

$$\delta q = C_v \delta t + A \psi(t) \delta J_t \quad (1)$$

или

$$\frac{\delta q}{A \psi(t)} = \frac{C_v \delta t}{A \psi(t)} + \delta J_t.$$

Так как C_v — теплоёмкость при постоянном объёме — функция только температуры, то правая часть является полным дифференциалом. «Следовательно, функция $\psi(t)$, зависящая от одной температуры и притом линейным образом, есть интегрирующий делитель термического уравнения (1). В существовании подобного делителя и заключается, как известно, второй закон механической теории теплоты. В нашей теории он является не более как следствием основных предположений и для своего вывода не требует никаких новых допущений»².

Итак, в своём исследовании Умов распространяет принципы термодинамики на сплошную среду. Ясно, что идея потока тепла (теплового тока) приобретает при этом фундаментальное значение. Дальнейшим развитием этой идеи и является учение о движении энергии. Фундаментальная работа Умова, посвящённая учению о движении энергии, была рассмотрена нами в IV главе. Здесь коротко остановимся на истории защиты Умовым своей идеи.

Работа Умова «Уравнения движения энергии в телах» была представлена им в 1874 г. в Московский университет в качестве докторской диссертации. Оппонентами были А. Г. Столетов, механик Ф. А. Слудский, астроном В. Я. Цингер (в качестве неофициального оппонента). Защита продолжалась около шести часов: «понятия о движении энергии и её плотности встретили сильные возражения со стороны оппонентов», — пишет Умов в своей автобиографии. Неприятный осадок, оставшийся у Умова от диспута, вероятно, послужил причиной того, что он больше не возвращался к этой идее, которую через 10 лет с успехом применил Пойнтинг к теории Максвелла.

«Но история науки не ограничивается перечислением успешных исследований. Она должна сказать нам о безуспешных исследованиях и объяснить, почему некоторые из самых способных людей не смогли найти ключа знания и как репутация других дала лишь большую опору ошибкам, в которые они впали» (Максвелл).

В самом деле, почему такой крупный физик, как А. Г. Столетов, не оценил того нового, что содержалось в работе Умова, а его авторитет оказал в данном случае плохую услугу развитию новой научной идее?

¹ Н. А. У м о в, Избр. соч., стр. 116

² Т а м ж е, стр. 124.

На этот счёт можно строить только догадки, никаких подробных отчётов о диспуте не сохранилось. Единственное правдоподобное объяснение отрицательного отношения Столетова к идее Умова (степень доктора Умову была присуждена) заключалась в том, что она очень близка была к точке зрения энергетиков. Ученик Умова, его биограф и издатель А. И. Бачинский, писал в биографии Умова: «Никто до тех пор с такой определённости не говорил об энергии, как о с у б с т а н ц и и; никто не помышлял о возможности определить её движения»¹. Ту же точку зрения на идею Умова высказал в 1949 г. проф. Т. П. Кравец.

Столетов же относился к энергетике резко отрицательно. Через 20 лет после этого, когда учение о движении энергии прочно вошло в физику, он писал в статье «Гельмгольц и современная физика»: «Механическая гипотеза для объяснения новых явлений соответствует, по мнению Оствальда, «детскому состоянию интеллекта»; она вытекает из «молчаливого допущения, что механические энергии, с которыми мы всего более знакомы, суть единственные, какие вообще существуют». А в образчик того, как мы будем рассуждать, когда выйдем из «детского состояния», Оствальд внушает нам, например, что энергия имеет упругость (!) и носится через абсолютную пустоту (!)» (подчёркивание и восклицательные знаки в приведённой цитате принадлежат Столетову). «Такое направление весьма напоминает нам символизм так называемых декадентов, проявившийся в новейшей литературе»²,—пишет Столетов, выражая этим своё отрицательное отношение к энергетике и её проявлениям.

Вероятно, это и помешало ему увидеть прогрессивный, несомненно материалистический характер труда Умова, не имеющего ничего общего с идеалистическими измышлениями «декадентов».

В 1875 и 1876 гг. Умов ездил за границу, был у Кирхгофа и Гельмгольца, знакомился с постановкой практических работ по физике у Кирхгофа. В первую же свою поездку в 1875 г. Умов представил Кирхгофу свой мемуар «О стационарном движении электричества на проводящих поверхностях произвольного вида». «Результаты этой работы,— пишет Умов,— помещены были проф. Кирхгофом в Monatsberichte der Königl. Akademie der Wissenschaft zu Berlin за 1875 г. под заглавием: «Über die stationären elektrischen Strömungen in einer gekrümmten leitenden Fläche». Доказательство же этих результатов дано было проф. Кирхгофом отличное от моего...»³.

В своей работе, напечатанной им в 1878 г. уже после публикации Кирхгофа, Умов впервые решил своим оригинальным методом в общем виде задачу о распределении токов на поверхности, которую до него Кирхгоф решил для частного случая плоскости, а Больцман для случая сферической и цилиндрической поверхности. Хотя Умов и упоминается в статье Кирхгофа, однако Кирхгоф своей публикацией сделал то, что приоритет в этом вопросе приписывался ему, а не Умову. «Рассказывая об этом факте,— пишет Бачинский в своей биографии Умова,— и припоминая другие, известные ему случаи того же рода, Николай Алексеевич впоследствии в беседах любил предостерегать своих учеников от излишнего доверия к немецким учёным, хотя бы и знаменитым»⁴.

Из других работ, относящихся к математической физике и выполненным им в одесский период, назовём работу 1877 г. «О фиктивных взаимо-

¹ А. И. Бачинский, Очерк жизни и трудов Н. А. Умова, стр. 20.

² А. Г. Столетов, Собр. соч., т. II, стр. 320.

³ Н. А. Умов, Избр. соч., стр. 447.

⁴ А. И. Бачинский, Очерк жизни и трудов Н. А. Умова, стр. 25.

действиях между телами, погружёнными в среду постоянной упругости». Задача этой работы — представить возможный механизм взаимодействий дальнего действия типа, в частности, свести к соответствующим давлениям и натяжениям электрические и магнитные взаимодействия.

В следующем году Умов начал печатание курса математической физики. В 1881 г. Умов дал «Вывод законов электродинамической индукции», в 1883 г. появились две статьи, посвящённые вопросам теории колебаний под общим заглавием «Из лекций по математической физике». В 1885 г. Умов дал оригинальный метод вычисления интегралов Френеля, имеющих важное значение в теории дифракции.

Но Умов интересовался не только теоретическими проблемами. Он не мог остаться безучастным к захватившей в те годы почти всех физиков проблеме электрического освещения и в 1886 г. напечатал доклад, сделанный им в Одесском отделении РТО, «О различных системах электрического освещения лампами каления».

Вслед за этим появился цикл физико-химических работ Умова: «Законы растворимости некоторых солей» (1887), «Диффузия водного раствора поваренной соли» (1888), «Термопотенциал соляных растворов» (1889).

После экспериментальных исследований, проделанных им в 1890—1891 гг., появилось исследование «Дополнение закона гидродиффузии и новые диффузиометры» (1891) и некоторые другие работы.

В 1893 г. Умов переехал в Москву. Самый этот период был обставлен чиновниками Министерства просвещения так, чтобы осложнить взаимоотношения Умова с коллективом, в частности со Столетовым, и ещё более углубить раздор на факультете. Его назначение на кафедру Столетова и вопрос о его нагрузке решался в министерстве за спиной Столетова, что естественно не способствовало нормализации отношений с коллективом; к тому же Умова сразу же постарались втянуть в интригу с диссертацией Голицына, о чём особенно хлопотал реакционер профессор математики П. А. Некрасов, ставший вскоре попечителем.

Всё это сделало вступление Н. А. Умова в должность не совсем лёгким, а отношения с коллективом, в частности со Столетовым, а в дальнейшем с Лебедевым, не такими, каких требовали интересы дела. Однако именно Умову пришлось принять деятельное участие в строительстве нового здания физического института, которое закончено было в 1903 г., и тем самым довести до конца дело, начатое Столетовым.

В 1899 г. и начале 1901 г. в Московском университете прокатилась волна студенческих беспорядков. Правительство обратилось за помощью к профессорской коллегии. Была организована «Комиссия по вопросу о причинах студенческих волнений и о мерах к упорядочению университетской жизни». Одним из 12 членов этой комиссии был Н. А. Умов, вообще склонный к «профессорскому либерализму» в оценке явлений общественной жизни.

Как известно, Ленин отзывался на студенческие беспорядки 1899 г. большой статьёй «Отдача в солдаты 183 студентов», напечатанной в февральском номере «Искры» за 1901 г. В этой статье Ленин писал: «Студент шёл на помощь рабочему — рабочий должен прийти на помощь к студенту. Правительство хочет одурачить народ, заявляя, что стремление к политическому протесту есть простое бесчинство. Рабочие должны публично заявить и разъяснить самым широким массам, что это — ложь, что настоящий очаг насилия, бесчинства и разнузданности — русское самодержавное правительство, самовластие полиции и чиновников» (Соч., т. 4, стр. 392).

Ленин призывал протестовать против правительственной расправы со студентами. Правительство и обратилось к профессорам, чтобы они призывали студентов «успокоиться», «не поддаваться посторонним волнениям» и «уважать науку». Вместе с тем правительство требовало, чтобы профессора продолжали чтение лекций при любом составе слушателей. Это требование вызвало резкий протест К. А. Тимирязева... «Требовать, чтобы через день после того как в стенах университета едва не дошло до пролития крови, когда сотни товарищей находятся ещё в заключении, ожидая неизвестной участи, требовать, чтобы при таких условиях молодой человек хладнокровно обнаруживал интерес к ботанике или астрономии,— значит требовать противно человеческой природе, природе молодого человека и русского молодого человека в особенности... принудительное чтение лекций перед взволнованной, потрясённой аудиторией не считалось признаком уважения к университету. Любовь и уважение к науке похвальна, но она не устраняет любви и сострадания к человеку»¹.

Когда профессора всё же подчинились требованиям правительства и обратились с воззванием к студентам, Тимирязев в знак протеста вышел в отставку. Студенты же ответили на обращение профессоров прокламацией, которая начиналась словами:

«В здании Московского университета вывешено объявление за подписью 71 профессора, которое своим толкованием студенческих беспорядков имеет целью обмануть не только общество, но и студенчество. Студенческие беспорядки настоящие, как и доселе бывшие, вызываются не посторонними элементами, на которые так обрушивается профессорское негодование: причина их всякий раз лежит глубоко в недрах университетской жизни. Вы говорите, что слово «забастовка» уничтожает самое название университета. Но что значит название рядом с действительным уничтожением самого учреждения, тем уничтожением и задушением, которому систематически предаются наше правительство и его министры, даже назначенные из профессорской среды?» Ответ заканчивался словами:

«Нет, люди, не признающие мрачных сторон студенческой жизни, люди, предлагающие смириться перед солдатчиной и нагайками, не могут называться нашими «друзьями», «товарищами» и «учителями». Эти имена мы разделяли с теми группами общества, которые так или иначе выражают нам сочувствие в борьбе за наше человеческое достоинство и свободу, без которых не может жить и наука»².

Так ответило передовое московское студенчество «примирителям», профессорам, поддавшимся на провокацию правительства. Они солидаризовались с рабочими, с Лениным, в которых справедливо видели защитников человеческого достоинства и науки.

Умов в первые семь лет работы в Московском университете не сделал существенных работ.

В эти годы он подготовил свой «Курс опытной физики», содержание которого было рассмотрено нами в первой главе.

«После смерти А. Г. Столетова в 1896 г., — пишет Умов в своей автобиографии, — я стал читать и часть его курсов по опытной физике и получил в свое заведывание часть физической лаборатории»³. Умову пришлось также, как уже говорилось выше, «совместно с проф. А. П. Соколовым и П. Н. Лебедевым принять деятельное участие в составлении

¹ А. К. Тимирязев, Страница из биографии К. А. Тимирязева (в сб «К. А. Тимирязев—мыслитель, борец, учёный», стр. 32).

² Там же, стр. 33—34.

³ Н. А. Умов, Избр. соч., стр. 24.

плана и постройке обширного физического института в Москве». «Наблюдение за постройкой,— вспоминал Умов,— и пререкания по её поводу в учреждённой комиссии брали много времени и сил у Н. А.»¹. Отражением этой борьбы Умова является его статья в «Русских ведомостях» за 1898 г., посвящённая физическому институту Московского университета.

В этой статье Умов указывает на то значение, какое получила наука в науке современного общества, на её роль в соревновании наций. Умов указывает, что «без творчества, без развития созидательных способностей международный духовный баланс нации неминуемо должен привести её к банкротству»². «Признание нового требования современного образования с величайшей ясностью выступает в том обновлении, которое ожидает Московский университет. Музей, кабинет — вот термины, характеризующие прежний взгляд: учись; институт — вот новый взгляд: учись и твори, созидай!»³.

В своём «Докладе о сооружении Физического института», поданного в качестве приложения к заявлению на имя ректора от 13 августа 1897 г., Умов указывает на растущую роль науки в развитии промышленности:

«История физики и химии,— пишет Умов,— показывает нам, что открытия учёных, не преследовавших в своих изысканиях специальной практической цели, но работавших в области чистой науки, получили неожиданные применения в промышленности и технике, причём влияние их на экономическое благосостояние государств в настоящем и будущем не поддаётся даже приближённому подсчёту... В сознании указанного факта правительства Западной Европы покрывают свои большие и малые владения сетью физических институтов...»

Как и Столетов, Умов правильно оценивает новые требования, предъявляемые к физической науке жизнью, и необходимость новых условий для её успешного развития: «До последнего времени кафедры физики могли доставлять только ограниченное число подготовленных работников, которые для утилизации своих способностей и познаний должны большей частью обращаться к учреждениям Запада».

«Такое положение дел, несогласное ни с обязанностями, ни с достоинством русской нации, должно окончиться»⁴,— справедливо заключает Умов и предлагает план строительства института, составленный подкомиссией из физиков (Умова, Соколова, Лебедева), которая изучила опыт строительства институтов на Западе: «некоторые из её членов в вышеуказанное время в течение трёх лет специально объезжали институты с целью более близкого ознакомления с их устройством».

В 1903 г. институт был построен и с 1904 г. начал функционировать. Но в 1911 году институт лишился Лебедева и Умова и фактически прекратил работу до Октябрьской революции.

Кроме организационных и педагогических обязанностей Умов в эти годы вёл большую научно-общественную популяризаторскую работу. На IX съезде русских естествоиспытателей и врачей он выступил с докладом «Вопросы познания в области физических наук». Здесь Умов останавливается на кризисе формальных теорий, созданных «для раздельных классов явлений», которые «остановились в своём развитии, смущённые нивелирующими законами взаимной превращаемости явлений...»⁵. Говоря о борьбе

¹ Н. А. Умов, Избр. соч., стр. 25.

² Н. А. Умов, Собр. соч., т. III, М., 1914, стр. 143.

³ Там же.

⁴ Там же, стр. 577—578.

⁵ Там же, стр. 59.

двух направлений—формально-описательного, которое Умов называет «символическим», и «рационалистического», Умов обращается к XVII веку, к борьбе ньютоновского и картезианского направлений. Именно в картезианском направлении по мнению Умова заложена «основа рационального объяснения явлений». Согласно картезианским представлениям, «вся вселенная есть машина, в которой следует изучать только формы и движения её частей. Законы механики становятся основаниями науки о вещественном мире».

«Современной физике прилагают эпитет картезианский, так как в идеях Декарта мы находим её основы: 1) механическая природа физических явлений, 2) инерция материи, 3) сохранение вещества и энергии, 4) существование эфира¹. «XVIII век произнёс суровый приговор над картезианскими учениями, бледневшими перед гениальными открытиями Ньютона и противоречившими новым научным фактам. Ньютонианская школа сознательно исключила гипотезу из области физики»².

В XIX веке снова возвращаются к гипотезам: молекулярная гипотеза в учении о веществе, гипотеза эфира в оптике—электричестве, «блестящие научные теории в рамках картезианских учений»³. Но к концу века начинается новый поворот.

«Около 70-х годов нашего века теоретическое исследование явлений, построенное на почве механического мировоззрения, сделало такие блестящие успехи, что целью естествознания ставилось объяснение природы. С другой стороны, описательные естественные науки торжествовали, получив возможность в гипотезе Дарвина не только описывать формы живых существ и явления жизни, но и объяснить их. Станным образом почти одновременно физика делает обратный шаг.

Знаменитый Кирхгоф провозглашает идеи, отставляющие физику в область теоретических наук. Этот взгляд находит себе последователей: Умов цитирует Дюгема, что «лучшей теорией будет та, которая введёт в свои рассуждения величины, имеющие физический смысл и непосредственно измеримые», и спрашивает:

«Не слышим ли мы в этих словах такого же осуждения гипотез, как и в XVIII веке»⁴. Историческая борьба, прослеженная Умовым в его докладе, «даёт и надежду и успокоение».

Таким образом Умов отвечает на начавшийся в физике кризис механического мировоззрения историей. История учит, что и описание и гипотеза правильно использованные, позволяют глубже проникнуть в сущность вещей.

В 1896 г. Умов выступил с блестящей речью «Значение Декарта в истории физических наук», посвящённой 300-летию со дня рождения Декарта. Умов вновь обращается к истории для анализа современной ему ситуации в физике. Эта апелляция к истории у Умова не является случайностью; он считает весьма вероятным, «что в мире мысли, как и в материальной природе, нет произвольного зарождения, а существует только развитие, эволюция; что современная мысль возникает на неосознаваемом фоне идей, переданных нам предшествующими поколениями...»⁵.

Именно с этой точки зрения подходит Умов к физике Декарта, оценивая с современной точки зрения идеи картезианского или кинетического

¹ Н. А. Умов, Собр. соч., т. III, стр. 64.

² Там же, стр. 65.

³ Там же, стр. 66.

⁴ Там же, стр. 72.

⁵ Там же, стр. III.

мировоззрения. Исторической заслугой Декарта Умов считает его разработку общего плана познания природы, единого методологического подхода к явлениям. Умов считает, что план «физических учений Декарта сохраняет свою силу до настоящего времени, и его рамки ещё не заполнены научной мыслью»¹. Касаясь борьбы картезианского кинетического мировоззрения с ньютономским динамическим, Умов отмечает победу кинетического мировоззрения над сторонниками динамизма в области электродинамики. «Действие не передаётся через пустоту, а только через матерню. Эта идея, усматривающая в силе, согласно с Декартом, не свойство материи, но задачу, подлежащую разрешению, оказалась в высшей степени плодотворною в области электромагнитных явлений»².

Что же такое сила с точки зрения кинетического мировоззрения?

«Сила, т. е. причина, изменяющая движение тела, есть движение видимой нами материи, окружающей тело. Так решается эта задача в целом ряде современных нам теорий. Рядом с непосредственно ощущаемыми нами телами или материальными массами Дж. Дж. Томсон и знаменитый физик Герц принимают скрытые массы и скрытые движения»³.

Эта точка зрения приводит к отрицанию потенциальной энергии. «С точки зрения современных картезианцев существует только одна энергия — кинетическая. Потенциальная энергия есть кинетическая энергия скрытых от нас движений»⁴.

Знаменитое учение Умова о движении энергии теснейшим образом связано с этой идеей. Мы уже говорили об этом в четвёртой главе. Если идеи Томсона и Герца генетически связаны с картезианской концепцией непрерывной материальной среды, то циклические движения Гельмгольца, по Умову, родственны вихрям Декарта.

С исключительной прозорливостью Умов берёт под защиту осуждённый тезис Декарта: «Можно утверждать с достоверностью, что камень неодинаково расположен к принятию нового движения или к увеличению скорости, когда он движется очень скоро и когда он движется очень медленно»⁵. Умов утверждает, что аксиома Пьютона о независимости действия сил от состояния движения может оказаться несостоятельной «и в простом случае падения тел, если тела будут двигаться со скоростями, сравнимыми со скоростью света»⁶.

Картезианская идея массы, как указывает Умов, основана на идее неразрывной связи тела со средой, поэтому масса зависит от состояния среды.

Умов заканчивает свою речь изложением основных понятий механики Герца, основанной на кинетических картезианских представлениях. Подводя итоги борьбы динамизма и кинетики, он вновь, как и в речи на IX съезде естествоиспытателей, делает вывод из исторического анализа этой борьбы, что «попеременное колебание их мощности приводит современных представителей знания к более объективному и спокойному суждению о физических теориях».

Может показаться, что Умов в своих симпатиях к кинетике и механическому объяснению природы в духе Декарта консервативен и не чувствует надвигающегося крушения механистического мировоззрения. Победа максвелловской электродинамики действительно заставила вспомнить о старых

¹ П. А. Умов, Собр. соч., т. III, стр. 100

² Там же, стр. 107.

³ Там же, стр. 108.

⁴ Там же, стр. 109.

⁵ Там же, стр. 115.

⁶ Там же, стр. 116.

идеалах Декарта. В своей речи при открытии Международного конгресса физиков 1900 г. Корню восклицал:

«Дух Декарта носится над современной физикой; больше того: он светоч её; чем дальше подвигаемся мы в познании явлений естественного мира, тем более развивается и утверждается смелая декартовская концепция механизма вселенной. Нет в физическом мире ничего вне материи и движения»¹.

Картезианство конца XIX в. — это не картезианство XVII в.; это итог трёхвекового развития физики: *в мире нет ничего, кроме движущейся материи*. Из физической картины мира исчезли один за другим невесомые флюиды, дальнедействующие элементарные силы заменились концепцией поля, и остались только материя и движение. Но движение — это не механическое перемещение масс. И тот же Умов, готовясь в конце 1909 г. к университетской речи «Эволюция атома», высказал пророческие слова о будущей науке.

«Мы полагали в конце столетий, потраченных человеческой мыслью, что наука работает уже в сокровеннейших глубинах природы. Оказывается, что мы работали все время лишь в тонкой коре мироздания! *Нам предстоит новая громадная задача: физика и химия атома — микрофизика и микрохимия* (подчёркнуто мной. — П. К.). И мы стоим перед нею почти так, как стояли учёные в области электричества два столетия назад, зная только, что натёртая смоляная палочка притягивает лёгкое тело. В новой области опыт труден *за недостаточностью научной техники* (подчёркнуто мной. — П. К.) и единственный путь есть пока наблюдение и совершенствование методов. И если мы сравним электричество — забаву с электричеством в служении человечеству, *каких успехов должны мы ожидать в течение двух ближайших столетий?*»

*Жизнь внутреннего мира атома откроет нам свойства и законы, быть может, отличные от тех, которые составляют содержание старой, уже древней физики*².

Эти замечательные слова говорят сами за себя. Наука XX в. создала микромеханику с законами, отличными от законов классической физики; уже возникла атомная техника, и трудно предвидеть грядущие успехи атомной науки.

Последующие работы Умова — в том числе его замечательные исследования по земному магнетизму — выходят из намеченных нами хронологических рамок. Отметим в заключение, что Умову пришлось испытать все последствия правительственной реакции после разгрома революции 1905 г. Вместе с группой других профессоров Московского университета он ушёл из университета, из физического института, строительству которого уделял так много времени и сил. Умер Умов в 1915 г.

А. П. Соколов. Алексей Петрович Соколов (1854—1928) в рассматриваемый период времени занимался проблемой электролиза. Он изучал гальваническую поляризацию и в особенности подробно и тщательно электроёмкость электролитического конденсатора, в качестве которого он рассматривал вольтметр с платиновыми электродами.

При электролизе на этих электродах возникают ионные слои и таким образом вольтметр превращается в систему двух конденсаторов, соединённых проводящим слоем электролиза. По экспериментам Соколова 1896—

¹ Л. Пуанкаре, Эволюция современной физики, СПб., 1910, стр. 10.

² Н. А. Умов, Собр. соч., т. III, стр. 284.



А. П. Соколов

1897 г. электроёмкость такого вольтметра, какова бы ни была химическая природа электролиза, является всегда функцией способа и продолжительности заряжения его. Соколов пришёл к выводу, что, пока не началось постоянное разложение электролита, процесс поляризации вольтметра складывается из двух главных моментов:

1) процесса собственной поляризации электродов, обусловливаемого выделением электроотрицательных ионов электролита у анода и электроположительных ионов у катода и 2) побочных процессов электрической конвекции и главным образом электрической абсорбции при участии газов, растворённых в жидкости и скопленных на поверхности или внутри электродов. Первый процесс есть процесс чисто конденсаторного заряжения вольтметра и ём-

кость, ему соответствующая, ёмкость поляризации есть величина совершенно определённая». Однако величину этой ёмкости Соколов определить не смог.

Эксперименты Соколова позволили решить длительный спор, имеется ли в электролитах металлическая (т. е. электронная) проводимость, и тем самым вопрос о точности закона Фарадея. Доказав существование поляризации при электродвижущих силах в 0,001 в, Соколов решил вопрос в пользу отсутствия металлической проводимости. Для зависимости электродвижущей силы поляризации от давления гремучего газа, собирающегося над поверхностью электролита, была найдена формула:

$$E = E_a + \frac{10^{-7} c T R}{6} \lg p;$$

здесь c — электрохимический эквивалент, R — газовая постоянная для водорода, T — температура, $E_a = E$ при $p = 1$. Гельмгольц полагал $E_a = 1,6447$ в. Соколов при малых давлениях p нашёл $E_a = 0,745$ в.

Для Московского университета большое значение имела деятельность Соколова по организации и развитию физического практикума. Ему удалось создать первоклассный для своего времени практикум, а составленное им руководство явилось классическим учебником, выдержавшим ряд изданий.

В дальнейшем Соколов был одним из первых в России исследователей радиоактивности и организаторов радиоактивной лаборатории Московского университета.

Другие физики
Москвы.

Ученик Столетова Николай Петрович Кастерин (1869—1947), соратник Лебедева, в указанный период сделал очень важное открытие дисперсии звука (1898). Он дал теорию дисперсии и проверил её экспериментально на модели с резонаторами. В его опытах резонаторы располагались на равных расстояниях внутри длинной трубы; измерялись для различных тонов $\frac{\lambda}{2}$ в отсутствии

резонаторов и $\frac{\lambda'}{2}$ при наличии резонаторов, отсюда определялся показатель преломления n . В опытах Кастерина $\frac{\lambda_0}{2} = 82$ мм, где λ_0 — длина волны, поглощённой резонатором, соответствующая его резонансной частоте. Опыты дали

$\frac{\lambda}{2}$	$\frac{\lambda'}{2}$	n наблю- дѣнное	n вычис- ленное
103 мм	98 мм	1,05	1,07
98	90	1,09	1,10
91	78	1,17	1,13
76	80	0,95	0,95
71	79	0,90	0,89
68	69	0,98	0,94
55	55	1,00	—
44	43	1,01	—

Таким образом, при приближении λ к λ_0 нормальная дисперсия сменяется аномальной. Открытие аномальной дисперсии звука Кастериным было одним из выдающихся достижений физики Московского университета в этот период. Представленная Кастериным в качестве магистерской диссертации, эта работа была признана факультетом заслуживающей присуждения докторской степени. Своей работой Кастерин проложил путь исследования распространения волн в неоднородной среде, его работа ныне считается классической.

Такова была смена Столетова в Московском университете. Следует упомянуть ещё и о талантливом лаборанте университета Иване Филипповиче Усагине (1855—1919). Усагин был «открыт» Н. А. Любимовым. Посещая одну из московских лавок (т. е. мелких магазинов), Любимов обратил внимание на юношу-продавца, читавшего книгу. Книга была физикой Павлова. Юноша оказался пасынком владельца лавки. Склонность Усагина к науке тронула Любимова, и он, надев предварительно все свои ордена, отправился к отчиму, чтобы уговорить его отдать юношу в учение в университет. Лавочнику не хотелось терять работника, однако он всё же уступил «важному генералу». Под руководством Любимова Усагин прошёл курс математики и физики и стал выполнять обязанности препаратора при кабинете физики. Благодаря Усагину уровень демонстрационного эксперимента в университете был очень высоким. Одним из первых Усагин начал демонстрировать в проекции броуновское движение. В 1882 г. на промышленной выставке в Москве было продемонстрировано распределение света с помощью трансформаторов Усагина, отличавшихся от трансформаторов Яблочкова тем, что в них первичная и вторичная обмотки были одинаковыми. Усагин принимал деятельное участие в конструировании аппаратуры (в частности им был усовершенствован насос Шпренгеля) для опытов Столетова по фотоэффекту. Им были получены прекрасные цветные фотографии спектров. В последние годы жизни Усагин был членом Коммунистической партии.

Ученики Столетова работали не только в Московском университете. В рассматриваемый нами период кафедру общей физики в Московском высшем техническом училище возглавлял Владимир Сергеевич Щегляев (1841—1916), в Сельскохозяйственном институте (ныне Академия имени К. А. Тимирязева) Владимир Александрович Мильсон (1860—1927).

В. С. Щегляев занимался исследованием диэлектрических постоянных газов и жидкостей, вопросом, глубоко интересовавшим Столетова и его



В. С. Щегляев

учеников и имеющим важное значение для обоснования теории Максвелла. Диссертация Щегляева «Экспериментальное вращение плоскости поляризации света в хлорном железе» (1885) также относилась к «максвелловской» тематике.

В. А. Михельсон был одним из любимых учеников Столетова. В письмах Столетова к Михельсону сквозит самое горячее участие учителя в работе и жизни своего ученика. Первоначально Столетов думал «сосватать» Михельсона на юг, в Новороссийский университет, но потом Михельсон остался в Москве в Сельскохозяйственной академии (в конце века «разжалованной» в институт за студенческие беспорядки), в которой работал до конца своей жизни и создал прекрасную метеорологическую обсерваторию.

В. А. Михельсон прежде всего выдвинулся как глубокий теоретик. Мы уже имели случай говорить о его пионерской работе по чёрному излучению.

В ряде работ (ЖРФХО, т. XIX, 1887; phil. Mag. XXV, 1888; ЖРФХО, т. XXI, 1889) Михельсон развивал теоретические обоснования распределения энергии чёрного излучения. Найденная им функция распределения

$$E = CT^{\frac{3}{2}} \lambda^{-6} e^{-\frac{c}{\lambda^2}}$$

не находится в полном согласии с опытом (в частности из неё вытекает, что максимум энергии приходится для волн, удовлетворяющих закону $\lambda^2 T = \text{const}$, вместо закона Вина $\lambda T = \text{const}$). Однако соображения Михельсона осветили путь решения проблемы, и последовавший за Михельсоном Вин не случайно уделил в своём докладе на Международном конгрессе физиков большое внимание теории Михельсона.

Магистерская диссертация Михельсона, представленная им в 1894 г., посвящена вопросу о нормальной скорости воспламенения горючих газовых смесей. Этой работой Михельсон начал разработку важных и сложных проблем физики горения и взрыва.

«Мысль об исследовании горения, — говорит Михельсон, — пришла мне в голову десять лет назад, когда я ещё изучал качественный анализ в лаборатории В. В. Марковникова, и там, конечно, по необходимости ежедневно помногу часов имел перед глазами пламя бунзеновской горелки. Тогда же мне стало ясно, что если пламя, питаемое взрывчатой смесью, остаётся по виду неподвижным, то это может быть осуществлено лишь особого рода динамическим равновесием. Условие этого динамического равновесия состоит в том, чтобы в каждой точке внутренней поверхности пламени, называемой мною поверхностью воспламенения, нормальная к поверхности слагающая скорости истечения струй газа была равна по величине и противоположна знаку скорости воспламенения сжигаемой взрывчатой смеси»¹.

¹ «Очерки по истории русской физики», Учпедгиз, 1947, стр. 188.

Результаты своего исследования Михельсон резюмирует следующим образом:

«1) Взрывная волна и пламя Бунзена представляют два крайних и типичных способа воспламенения взрывчатых газов. Первая соответствует почти адиабатному сжатию газов до температуры воспламенения, второе — чисто теплопроводному распространению реакции.

2) Нормальная скорость воспламенения, как она определена мною в настоящей работе, есть величина столь же характеристичная для газовой смеси, как и коэффициент теплопроводности или внутреннего трения, удельная теплота и т. п.»¹.

Эту важную характеристику Михельсон определяет следующим образом. Передача энергии от воспламенения слоя к следующему должна быть достаточно интенсивной, чтобы доводить холодный слой до воспламенения. Во взрывной волне эта энергия передается механическим путем, в пламени Бунзена теплопроводностью. Трудность определения необходимой скорости состоит в том, что скорость распределения пламени зависит от условий его распространения. Михельсон прежде всего вводит понятие о *поверхности сгорания*, под которой он понимает тонкий слой газовой массы, находящейся в данный момент в состоянии сгорания. Далее он говорит:

«Рассмотрим два бесконечно близких последовательных положения поверхности сгорания, соответствующих времени t и $t + dt$. Расстояние между двумя элементами этих поверхностей, измеренное по нормам к первой из них, и будет изображать собой путь dn , пройденный элементом пламени во время dt . Следовательно, скорость воспламенения в рассматриваемой части поверхности будет:

$$v = \frac{dn}{dt}.$$

Эту величину мы и называем *нормальной скоростью* воспламенения рассматриваемой смеси»².

При этом определении «предполагается, что не воспламенившиеся части газа находятся ещё в полном покое».

«3) Употреблённый мной уже раньше рекомендованный метод наблюдения есть единственный, дающий нам действительно характеристическую для газов «нормальную скорость воспламенения».

4) Нормальная скорость воспламенения всех исследованных смесей при постоянном (атмосферном) давлении и свободном расширении продуктов горения, значительно меньше чем величины, найденные Бунзеном, Малларом и Ле Шателье.

5) Наибольшие скорости воспламенения исследованных смесей не соответствуют эквивалентному отношению составных частей, но получаются всегда при некотором избытке «сжигаемого» (окисляемого) газа.

6) Кривые, представляющие закон изменения нормальной скорости воспламенения с процентным составом смеси, не состоят из двух пересекающихся прямых, но имеют ясно выраженную кривизну, нигде не обращающуюся в бесконечность.

7) Принимая во внимание трение газа, зависимость нормальной скорости воспламенения от кривизны поверхности пламени и наконец вне-

¹ В. А. Михельсон, О нормальной скорости воспламенения гремучих газовых смесей, Ученые записки ИМУ, Отд. физ.-мат., вып. 10, 1893, стр. 91.

² Там же, стр. 24.

зальное расширение газов при сгорании, можно построить удовлетворительную теорию пламени Бунзена»¹.

Эта теория была построена Михельсоном в третьей главе его диссертации. Следует отметить, что, готовя тезисы к защите, Михельсон обратился к идее Умова о движении энергии. В письме к Столетову из Давоса от 30/IX 1892 г. он обращается с просьбой: «не можете ли Вы прислать мне ту или те работы Умова, в которых затрагивается вопрос о «движении энергии...» Теперь мне хотелось бы удостовериться—не предвосхитил ли Умов часть воззрений Poynting'a. О последнем я может быть соберусь написать статью в связи с работой моего товарища (по Берлину) W. Wien'a».

Столетов немедленно выслал Михельсону статью Умова. В письме от 5/XI 1892 г. Михельсон благодарит Столетова и пишет:

«Во всяком случае в «Уравн. движ. энергии» заключается много тождественного с тем, что Poynting лишь в настоящем году опубликовал... как нечто новое и, если мне удастся написать что-либо стоящее печати по этому вопросу, то придётся восстановить, хотя бы мимоходом, приоритет русского ученого».

Столетов высоко оценил труд молодого учёного. В своём отзыве он писал:

«В общем итоге диссертация, как по искусству математического анализа в применении к явлению сложному и мало изученному, так и по достоинствам экспериментального характера, — принадлежит к числу выдающихся работ, какими редко бывают дебюты молодых ученых. Встречая столь зрелый труд в качестве магистерской диссертации, положительно удивляешься и смелости, инициативе, и изворотливости автора в преодолении неблагоприятных пунктов».

Указав на работы Михельсона по излучению, актинометрии и другие работы, в частности на статью «О многообразии физических теорий», где Столетов отмечает михельсоновскую критику взглядов Пуанкаре («формулирует очень меткие замечания, отчасти возражая против взглядов французского ученого,— замечания, близко совпадающие с опубликованными уже позднее идеями Больцмана»), Столетов делает общий вывод:

«При наличности стольких блестящих доказательств научной зрелости и выдающейся даровитости В. А. Михельсона, проявленных частью при столь тяжелых для него условиях (Столетов имеет в виду болезнь Михельсона), — вопрос об удостоении магистранта искомой им учёной степени, конечно, решается без колебания. Но я желал бы надеяться (как и высказал уже в моем предварительном весеннем заявлении), что факультет найдёт справедливым отметить возвращение г. Михельсона к научной и преподавательской деятельности особым почётом, и, применяя к нему (в случае удовлетворительного диспута) ст. 88 Устава, будет ходатайствовать о возведении его прямо в степень доктора физики».

А. Столетов

2 октября 1894».

Докторская степень Михельсону была присуждена, и эта оценка факультета и Столетова вполне оправдана.

«Теперь мы во всей мировой литературе не найдём ни одного учебника, руководства, монографии, где бы не приводились результаты работы Ми-

¹ В. А. Михельсон, О нормальной скорости воспламенения гремучих газовых смесей, стр. 91 - 92.

хельсона по горению», — указывает видный специалист в вопросах физики горения А. С. Предводителей.

В. А. Михельсон много и успешно занимался актинометрией; им построен оригинальный прибор для измерения солнечной постоянной (актинометр Михельсона). Далее им было сделано важное обобщение принципа Допплера на случай среды с переменным показателем преломления.

Чтобы дополнить картину состояния московской физики в эпоху Столетова, упомянем здесь о важном обстоятельстве. Ряд исследований по физике и диссертационных тем были выполнены теперь русскими учёными не за границей, а в Москве. Многие из этих работ, как, например, классические работы Лебедева по световому давлению и двойному преломлению лучей электричества, имели мировое значение. В этом имелаась заслуга Столетова, активно боровшегося за преодоление отставания русской науки.



В. А. Михельсон

Ф. Ф.
Петрушевский.

Переходим к петербургской физике. Во избежание недоразумений поясним здесь, что слова «московская», «петербургская» физика и т. д. мы употребляем как удобные термины для обозначения места работы тех или иных физиков, которые ни в коем случае не должны давать повода для спекуляции о каких-то особых петербургских, московских и т. п. физических науках.

Лидером петербургской физики в рассматриваемую нами эпоху был профессор Петербургского университета Фёдор Фомич Петрушевский (1828—1904). Петрушевский был учеником Ленца, и это обстоятельство наложило сильный отпечаток на характер рассмотренного уже нами во второй главе «Курса наблюдательной физики» Петрушевского. Однако Петрушевский пошёл дальше своего учителя и сыграл большую роль в развитии преподавания физики и повышения уровня физических знаний в России. После смерти Ленца уровень физической науки в Петербурге, да и во всей России был очень невысок. По воспоминаниям Н. А. Гезехуса, физика в России в те времена «была в совершенном младенчестве и полном застое». «Ни преданий, ни школ, ни студенческих практических занятий, без которых трудно выработаться хорошему экспериментатору; ни средств и необходимой обстановки, которые образуются лишь постепенно, медленно; ни органа, ни собраний, которые дали бы возможность обмениваться мнением и возбуждали бы к деятельности, — всего этого не было тогда и в помине».

Мы говорили выше о героической борьбе Столетова в Москве за ликвидацию этого застоя. В Петербурге ту же задачу решал Петрушевский. О его студенческих годах и первых научных работах ученик и сотрудник Петрушевского В. В. Лермантов рассказывает: «Свои работы по физике Эмиль Христианович (Ленц) делал в академической лаборатории, студентов туда он не пускал и при всяком желании «пощупать» приборы после лекции запреждал это, говоря: «Испортите». Физический кабинет университета при

нём содержал мало приборов для лекций, да и то Эмиль Христианович предпочитал пользоваться своими знакомыми приборами по академии, которые приносил его механик Ноак, служивший ему ассистентом на лекциях. В академическую свою лабораторию Эмиль Христианович допускал только нескольких избранных, из числа своих окончивших уже курс учеников, в числе которых был и Фёдор Фомич: первая его научная работа была сделана там в 1853 г.»¹.

Петрушевский не пошёл по стопам учителя, не замкнулся в стенах академической лаборатории. Он понял требования жизни и смело взялся за реформу рутинного физического образования.

«Великой заслугой академика Ф. Ф. Петрушевского,— писал далее В. В. Лермантов,— было то, что он «вдохнул душу живую» в преподавание физики в нашем университете. До него физику только «читали», как всякий другой предмет, нужный студентам для экзамена; Фёдор Фомич первый во-время понял, что наступает время, когда умения, основанные на знании фактов этой науки, станут необходимыми и для обыденной жизни. Понял он и то, что одним слушанием лекций никакого реального знания приобрести нельзя, кроме умения сдавать экзамены у своих профессоров. Реальные умения приобретаются лишь обращением с реальными объектами изучаемой науки, т. е. с явлениями природы и с приборами, служащими для их воспроизведения и измерения.»

В 1864 г. Петрушевский был назначен распорядителем физического кабинета университета и уже в следующем 1865 г. им были организованы практические занятия по физике для студентов четвёртого курса, а в 1866 г. и на третьем курсе. О характере этих первых занятий тот же В. В. Лермантов сообщает:

«В первое время можно было пустить в ход лишь очень немного опытов; удавалось отсчитывать показания барометра и устанавливать другой барометр с катетомером помощью уровня, определять удельный вес, постоянные точки термометра, фокусное расстояние стёкол и силу света, изменять силу тока тангенс-буссолью.»

Эти скромные эксперименты проводились к тому же в весьма неблагоприятной обстановке. «Комнаты физического кабинета были почти вполне заняты шкафами и приборами, так что для занятий оставалось очень мало места».

В 1867 г. Петрушевский получил в своё распоряжение пять комнат, новые приборы, в том числе и зеркальные гальванометры. Через два года лаборатория получила сверхштатного лаборанта (В. В. Лермантова). В 1874 г. лаборатория переехала в новое помещение, так называемое здание «Же де Пом». Через 10 лет Петрушевский возбудил ходатайство о постройке специального здания, которое было начато постройкой только в 1897 г. За тридцать пять лет деятельности лаборатории (1865—1900) через неё прошло 3500 студентов.

Другой важной стороной деятельности Петрушевского было его участие в организации и работе Русского физического общества. Это общество было организовано в 1872 г. (устав был утверждён 11/23 марта 1872 г.) по инициативе Ф. Ф. Петрушевского, который и был избран первым его председателем. В 1873 г. Физическое общество получило возможность публиковать статьи в журнале Химического общества, который с этого времени стал называться «Журналом Русского Физико-химического общества» (ЖРФХО).

¹ «Сборник статей, посвящённых памяти Ф. Ф. Петрушевского, СПб., 1904, стр. 14.

Первым редактором физической части ЖРФХО был профессор Петербургского университета Д. К. Бобылёв. В январе 1876 г. Д. И. Менделеев поставил вопрос об объединении химического и физического обществ. Это объединение и было осуществлено в январе 1878 г.

Русское физико-химическое общество, а в особенности ЖРФХО сыграли очень важную роль в развитии физики в России. Н. А. Гезехус был совершенно прав, что журнал Русского физико-химического общества отражал живое лицо физической науки в России; в нём печатались физические статьи русских учёных и рецензировались статьи, помещённые в других русских и иностранных журналах, так что ни одно из исследований русских учёных «вообще не минует Физического общества».

Петрушевский был бессменным председателем физического отделения и шесть раз (в 1887, 1888, 1891, 1893, 1895 и 1901 гг.) был президентом РФХО. После смерти Петрушевского в 1905 г. президентом общества был А. С. Попов.

При рассмотрении «Курса наблюдательной физики» Петрушевского нам уже приходилось говорить о его исследованиях, описанных в этом курсе, в том числе о магистерской и докторской диссертациях. В курс не вошла работа Петрушевского по влиянию магнитного поля на термоэлектрические явления, выполненная им в 1882 г.

Из других работ Петрушевского упомянем о его наблюдении аномального порядка фраунгоферовых линий при переходе света из одной среды в другую, показатель которой весьма мало отличается от первой, об исследовании цветов, причём им был построен прибор для нахождения цвета, дополнительного к данному (1897). Работы по исследованию цветов касались вопросов смешения красок, определения среднего цвета или тона многоцветной поверхности, влияния освещения. Помимо статей, помещённых в журнале Русского физико-химического общества за 1883, 1885 и 1897 гг., им написана в 1891 г. книга «Краски и живопись».

Другие физики
Петербурга.

Профессор аналитической механики и математической физики Дмитрий Константинович Б о б ы л ь е в (1842—1918), кроме работ по механике, дал ряд работ в области физики. В 1870 г. он издал работу «Поляризующие призмы, устроенные наивыгоднейшим образом»; в 1874 г. журнал Русского физико-химического общества опубликовал его статью о теории интерференционного рефрактометра Жамена. В 1873 г. он поместил в том же журнале статью о рассеянии электричества в воздухе заряжёнными проводниками и из кинетической теории газов показал, что это рассеяние уменьшается с уменьшением давления. В то же время (1874) он решал задачу о распределении электричества на двух шарах; в 1875 г. дал вывод формулы Ампера для взаимодействия элементов тока.

Из механических работ за этот период им были написаны: одна задача механики системы материальных точек (1888), краткий исторический очерк основных принципов и общих законов теоретической механики (1892), о шаре с гироскопом внутри, катящемся по горизонтальной плоскости без скольжения (1892), о начале Гамильтона или Остроградского и о начале наименьшего действия Лагранжа (1889), об одном частном решении дифференциальных уравнений вращения тяжёлого твёрдого тела вокруг неподвижной точки (так называемый случай Бобылёва-Стеклова).

Пётр Петрович Ф а н - д е р - Ф л и т (1839—1904) — профессор физики Петербургского университета, сотрудник Петрушевского по организации физического практикума. Его магистерская (1872) и докторская диссертации (1877) посвящены его теории электрического тока, изданной им

в 1881 г. под заглавием «Опыт физической теории электрического тока». В период многочисленных, нередко фантастических теорий о природе электрического тока эта теория была попыткой свести явления тока к механическому перемещению частиц проводника, накладывающемуся на их тепловое движение (прообраз электронной теории). Эти частицы увлекают с собой частицы эфира, что и обуславливает явления в пространстве, окружающем ток.

Несмотря на свою оригинальность, теория Фан-дер-Флита разделила участь всех современных ей теорий: она была вытеснена теорией Максвелла и электронной теорией.



Рис. 180. Группа профессоров физико-математического факультета Петербургского университета

Из других трудов Фан-дер-Флита известностью в 90-х годах пользовалась его книга «Введение в механику» (1886).

Занявший в 1890 г. после ухода Д. И. Менделеева кафедру неорганической химии Дмитрий Петрович Коновалов (1856—1929) был крупным физико-химиком (впоследствии он был президентом Главной палаты мер и весов, первым президентом которой был Менделеев). В 1884 г. он защитил магистерскую диссертацию «Об упругости пара растворов». В этом же году он в качестве приват-доцента университета начал читать новый курс физической химии. В 1885 г. он защитил докторскую диссертацию «Роль контактных действий в явлениях диссоциации».

Наибольшим влиянием среди петербургских и не только петербургских физиков этого периода пользовались Иван Иванович Боргман и Орест Данилович Хвольсон.

Иван Иванович Боргман (1849—1914) окончил в 1870 г. Петербургский университет со степенью кандидата и был оставлен для подго-

товки к профессорскому званию. В 1873 г. Боргман был в заграничной командировке в Гейдельберге, где работал у Кирхгофа. По возвращении в Петербург был назначен лаборантом физического кабинета у проф. Ф. Ф. Петрушевского и в этой должности помогал Петрушевскому в организации физической лаборатории.

В 1877 г. Боргман защитил диссертацию «на право быть избранным»: «О влиянии температуры на электропроводность углей» и был избран приват-доцентом. В следующем 1878 г. он защитил магистерскую диссертацию «Влияние среды на электродинамические явления и функции намагничения жидкостей». Тема эта свидетельствовала о повороте Боргмана к максвелловской тематике и до известной степени перекрывалась работой Зилова, в связи с чем возникла переписка со Столетовым. К этой же тематике относились его работы по выводу закона индукции из закона энергии, обобщавшей вывод Гельмгольца с позиций фарадеево-максвелловских представлений (1880) и дискуссия с Колли по вопросу о существовании пондероэлектрических сил (1881). В эти же годы Боргман занимался электрометрией, предложив ряд схем и конструкций, в частности мостик для измерения емкостей и конструкцию конденсатора переменной емкости.

В 1882 г. Боргман защитил докторскую диссертацию «Нагревание железа при прерывчатом намагничивании». Следует отметить, что явление гистерезиса в то время ещё не было известно. Сравнивая нагревание немагнитных и магнитных металлов индукционными токами, Боргман обнаружил, что железо нагревается сильнее, вследствие своих магнитных свойств. В качестве нагреваемых тел он брал медные и железные трубки, некоторые из которых были разрезаны по длине. Нагревание неразрезанных трубок оказалось в 1,5 раза больше разрезанных, медные разрезанные трубки не нагревались заметным образом.

В 1886—1887 гг. Боргман исследовал прохождение электрического тока через воздух при обычных условиях температуры и давления. Цепь тока состояла из двух проволок, электрической машины и гальванометра. Один конец первой проволоки соединялся с полюсом машины, другой с пламенем изолированной буizenовской горелки. С пламенем другой горелки соединялся один конец второй проволоки, другой конец которой соединялся с зажимом гальванометра. Другой зажим гальванометра и другой полюс машины заземлялись. В цепь таким образом включался промежуток воздуха между двумя горелками. При действии машины через гальванометр шел ток.

В 1889 г. Боргман исследовал фотоэффект. Он пытался обнаружить запаздывание появления тока после освещения. Опыт дал отрицательный результат.

В 1897 г. Боргман вместе с А. Гершуном обнаружил свойство рентгеновских лучей снимать заряд с наэлектризованных тел. В этот период и до конца жизни Боргман занимается явлениями электрического разряда в газах и исследованием радиоактивности.



И. И. Боргман

Большую роль в деле распространения среди русских электриков идей максвелловской электродинамики сыграла работа И. И. Боргмана «Магнитный поток и его энергия» (1-е издание вышло в 1892 г., 2-е издание в 1900 г.) и фундаментальный труд «Основы учения об электрических и магнитных явлениях», первое издание которой вышло в 1893—1895 гг., второе в 1897 г., третье в 1914 г. (переработанное). По инициативе И. И. Боргмана и под его редакцией в XX веке стало выходить неперiodическое издание «Новые идеи в физике». Вышедшие семь выпусков этого издания знакомили широкие круги физиков с животрепещущими проблемами современной науки: строением вещества, теорией относительности и квантами.

И. И. Боргман был одним из создателей физического института Петербургского университета, открытого в 1900 г. «Весь институт можно назвать делом его рук, — говорил О. Д. Хвольсон, — по его планам институт был построен, и он ежедневно следил за всеми многосложными деталями воздвигавшегося здания¹».

И. И. Боргман был избран экстраординарным профессором университета в 1888 г., а в 1894 ординарным профессором. С 1875 по 1902 г. он был редактором физической части журнала Русского Физико-химического общества.

Орест Данилович Хвольсон (1852—1934) окончил Петербургский университет в 1873 г. Ещё в университете он избрал специальностью математическую физику и получил золотую медаль за сочинение «О возможных скоростях и условиях равновесия соприкасающихся поверхностей». После окончания университета Хвольсон был за границей в Лейпциге у теоретика Карла Неймана. В 1874 г. Хвольсон вернулся в Россию, а в 1876 г. защитил магистерскую диссертацию «О механизме магнитной индукции». С 1876 по 1890 гг. он занимает в Петербургском университете должность приват-доцента, а с 1890 г. экстраординарного профессора математической физики. С 1898 г. он ординарный профессор по этой кафедре.

В 1880 г. он защитил докторскую диссертацию «О магнитных успокоителях». В числе первых работ Хвольсона, относящихся главным образом к вопросам электричества и магнетизма, были работы математического характера («О разветвлённых токах в плоской пластинке», «О магнитной индукции на двух шарах» и др.) и экспериментальные: «Влияние прокаливания на гальваническое сопротивление проволок», «Влияние давления и растяжения проволок на их сопротивление» и др.

После некоторых работ по фотометрии начинается цикл работ О. Д. Хвольсона по актинометрии, предпринятых им по инициативе академика Вильда. Для измерения солнечной постоянной им были сконструированы актинометр и пиргелиометр (1893—1894).

С 1895 г. начинается работа Хвольсона над созданием «Курса физики», получившим широкую известность не только в России, но и за рубежом. Первый том этого труда вышел в 1897 г., второй в 1898 г., третий в 1899 г. В 1902, 1904, 1905 гг. вышли немецкие переводы этих томов, французские переводы появились соответственно в 1906, 1908 и 1913 гг.

Приват-доцент университета Николай Григорьевич Егоров (1849—1919) был в то же время профессором Военно-медицинской академии, первым профессором физики которой был В. В. Петров. Магистерская диссертация Егорова, защищённая им в 1877 г., была посвящена электрическому фотометру: докторская, защищённая в 1882 г., — «Атмосферическим линиям солнечного спектра». Н. Г. Егоровым в Главной

¹ Журн. «ЖРФХО», 1915, вып. 1, стр. 8.

палате мер и весов была организована термометрическая, барометрическая и электрометрическая лаборатория.

В 1900 г. он перешёл в Палату на пост вице-президента. Приват-доцентом университета работал в это же время механик Иван Всеволодович Мещерский (1859—1935). Он является основоположником важной для современной техники механики переменной массы. В 1893 г. Мещерский сделал доклад по этому предмету, в 1897 г. появилась его магистерская диссертация «Динамика точки переменной массы». В этой работе им написаны уравнения движения точки с переменной массой (уравнения Мещерского).

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = X + \frac{dm}{dt} (\alpha - \dot{x});$$

$$m \frac{d^2y}{dt^2} = Y + \frac{dm}{dt} (\beta - \dot{y});$$

$$m \frac{d^2z}{dt^2} = Z + \frac{dm}{dt} (\gamma - \dot{z}).$$

Здесь m — масса движущейся точки, dm — отделившаяся за время dt масса, α , β , γ — компоненты скорости отделившейся массы («изменяющей массы» по терминологии Мещерского), $\dot{x}$, $\dot{y}$, $\dot{z}$ — компоненты скорости движущейся точки, X , Y , Z — компоненты действующей силы. Теорию, изложенную им в работе 1897 г., Мещерский обобщил в 1904 г., разработав теорию, имеющую важное значение для реактивных двигателей.

Из молодых физиков в 1900 г. работал приват-доцентом Владимир Владимирович Лермантов (1869—1923)—в дальнейшем известный методист и конструктор физических приборов; читал лекции теоретик Николай Александрович Булгаков (1872—1935). Лаборантами в физической лаборатории работали Алексей Алексеевич Петровский—впоследствии крупный специалист по радиофизике и радиотехнике, ученик А. С. Попова; Владимир Константинович Лебединский (1868—1937),— один из видных электриков и радиофизиков в русской физике в первой половине XX в., и Александр Львович Гершун (1868—1915),—впоследствии известный оптотехник; читал лекции Владимир Сергеевич Игнатовский (1872—1937)—впоследствии крупный специалист по расчёту оптических приборов; здесь же преподавал Николай Александрович Смирнов.

В Петербургском технологическом институте профессором физики был Николай Александрович Гезехус (1845—1918). В 1879 г. Гезехус исследовал поглощение водорода палладием и её сплавами. Изготовив проволоку 500 мм длиной и толщиной 0,4 мм, он нашёл, что эта проволока при поглощении водорода удлиняется, а её упругость меняется. После этого он обратился к изучению упругого последействия. Построив прибор специальной конструкции, он изучал упругое последействие каучука (1882). Упругим последействием он занимался в течение ряда лет и находил ему аналогии и в немеханических процессах. Так, начав с 1883 г. изучение проводимости селена (полупроводник, приобретающий проводимость при освещении), Гезехус предложил следующую теорию этого сложного явления, сущность которого раскрыта только в наши дни на основе квантовой теории. Селен может существовать в двух различных состояниях, которое Гезехус обозначил состояниями A и B (прообраз квантовых состояний!): A — непроводящее состояние, B — проводящее. Под действием света осуществляется переход из A в B , причём освобождается некоторое количество заряжённых

частиц (ионов), которое вновь рекомбинирует в молекулы при прекращении освещения. Действие света в поверхностном слое происходит мгновенно, а затем медленно распространяется вглубь. Исходя из этих соображений, Гезехус вывел формулу

$$i = a(b^s - 1),$$

где i — сила света, s — увеличение электропроводности селена, a и b — константы.

С 1885 г. Гезехус занимался вопросами акустики. Он исследовал звукопроводность, найдя ряд с возрастающей звукопроводностью: каучук, пробка, гуттаперча, дерево, стекло, сталь. Он установил, что звукопроводность стержней прямо пропорциональна их площади поперечного сечения и обратно пропорциональна длине. Чем больше поглощается звук в веществе, тем меньше его звукопроводность. В 1886 г. он проверил закон обратной пропорциональности силы звука квадрату расстояния от источника, исследовал преломление звуковых волн, построив акустическую чечевицу. Чечевица состояла из полусферической железной сетки, закрывающейся сетчатым железным кружком. Чечевицу наполняют исследуемым веществом — пухом или каучуковыми стружками — и вставляют в отверстие картонного экрана, перед которым помещается источник звука (свисток Гальтона) и в фокусе приёмник — манометрическое пламя. Сфокусировав звуковую волну, можно определить показатель преломления чечевицы и, следовательно, скорость звука, которая для пуха оказалась около 200 м/сек.

Гезехус сконструировал ряд демонстрационных и лабораторных приборов. Упомянем о воздушном калориметре (1889). Калориметр, содержащий воду при температуре t , вставляют в резервуар воздушного термометра, снабжённого манометром. Тело, теплоёмкость которого надо определить, нагретое до температуры T , опускают в калориметр, в который прибавляют p г холодной воды при температуре τ так, чтобы показание манометра не изменялось. Тогда теплоёмкость тела определяется из уравнения $x(T - t) = pc(t - \tau)$ (c — теплоёмкость воды; веса и теплоёмкости калориметра и прибора знать не надо).

В XX в. Гезехус разрабатывал теорию контактной электризации.

Доцентами на кафедре физики Технологического института работали Н. Н. Георгиевский, Б. Л. Розинг и по совместительству Н. А. Булгаков и А. А. Петровский. Н. Н. Георгиевский совместно с Н. Г. Егоровым в 1897 г. наблюдал частичную поляризацию при эффекте Зеемана. Их открытие было теоретически истолковано Г. А. Лоренцем. Приведём сжатое изложение этих работ в том виде, как они были прореферированы В. Фолькманом в *Fortschritte der Physik*.

«1. Н. Егоров и Н. Георгиевский, О поляризации излучения, испускаемого некоторыми источниками света под влиянием магнитного поля. С. R. 124, 748—749, 1897 (на фр. яз.). Авторы нашли, при попытках продемонстрировать элемент Зеемана в Петербургском медицинском институте, очень ничтожное расширение линии. Напротив, было очень легко наблюдать поляризацию света в анализаторе Савара. Она обнаружилась не только при применении пламени Na, Li и K, но также тогда, когда в качестве источника света берётся электрическая искра, проскакивающая между магнетовыми остриями. Напротив, никакой поляризации не замечается, если острия состоят из алюминия, цинка, висмута, железа или угля.

2. Н. Егоров и Н. Георгиевский, О частичной поляризации излучения, испускаемого некоторыми источниками света под влиянием магнитного поля. С. R. 124, 947—949, 1897 (фр.).

В дополнение к ранней заметке авторы сообщают: 1) компенсатор Бабине очень подходит для наблюдения явления; 2) для измерения поляризованной части полного количества света вставляется стеклянная пластинка, наклон которой относительно направления лучей может быть изменён измеряемым способом; эта пластинка употребляется так, что линейная поляризация экваториальных лучей будет тем самым компенсирована. При возрастании поля от 1800 до 8500 линейно-поляризованная часть возрастает от 2 до 11,5% всего количества света; 3) при данной силе поля поляризация возрастает с температурой пламени; 4) при исследовании различно окрашенных пламен или искр между металлическими остриями эффект будет тем больше, чем более легко обратимы линии; 5) в водороде и некоторых других материалах нельзя было обнаружить никакого эффекта.

3. Н. Егоров и Н. Георгиевский, О частичной поляризации светового излучения под влиянием магнитного поля. С. R. 125, 15—17, 1897. Авторы продолжали свои опыты и при этом нашли, что окрашенное пламя бунзеновской горелки расширяется магнитным полем, что влияние магнитного поля на обе L -линии заметно отличается по величине, что температура играет в явлении существенную роль, что легко обратимые линии легче всего обнаруживают явление и что полученные по методу Грамонта линии металлоидов остаются неизменными.

4. Г. А. Лоренц, О частичной поляризации света, излучаемого некоторым источником света, помещённым в магнитное поле (Verh. K. Ak. van Wet. Amsterdam, 6, 1897—1898, 193—208).

Вскоре после появления исследования Зеемана о световом излучении в магнитном поле Егоров и Георгиевский (С. R. 5 апреля, 3 мая и 5 июля 1897 г.) нашли, что спущенный источником света в магнитном поле перпендикулярно силовым линиям свет частично поляризован. А именно, световые колебания, параллельные световым линиям, имеют при этом меньшую интенсивность, чем колебания, перпендикулярные силовым линиям. Автор (т. е. Лоренц) объясняет это поглощением, которое испытывают лучи, идущие от задних частиц источника света в передних частях его. Как известно, такого рода абсорбция достигает максимума, когда существует равенство периодов между светящимися и абсорбирующими частицами. Это осуществляется при отсутствии магнитного поля. Все вибрирующие частицы имеют тот же период T . Но теперь Зееманом было найдено, что в магнитном поле период колебания частиц, колеблющихся в направлении магнитного поля, не меняется, оставаясь, таким образом, равным T ; напротив, периоды колебаний, перпендикулярных силовым линиям, увеличиваются или уменьшаются на одну и ту же величину. Новые периоды суть $T - \tau$ и $T + \tau$, где τ — малая величина. Абсорбция вертикальных колебаний будет поэтому ничтожна, и интенсивность этих колебаний превосходит интенсивность горизонтальных колебаний.

Автор даёт математическую теорию вынужденного колебания и абсорбции, которая подтверждает указанное объяснение. Кроме того, действительное существование изменения абсорбции вследствие изменения периода колебания вытекает из следующего опыта. Пусть натриевое пламя F_1 находится между полюсами, другое натриевое пламя находится сзади него и вне поля. При возбуждении магнетизма абсорбция, которую производит F_1 в F_2 , будет изменяться. Абсорбция горизонтальных колебаний остаётся неизменной, абсорбция вертикальных уменьшается. Поэтому свет от F_2 , после того как он прошёл F_1 (всё это будет наблюдаться перпендикулярно силовым линиям), частично поляризуется, и именно поляризация будет

той же, как поляризация испущенных F_1 лучей. При соответствующей регулировке пламени это действительно наблюдается».

Реферат составлен Зеemanом. Кроме того, на сообщения Егорова и Георгиевского откликнулись: А. Коттон во Франции и В. Кенниг в Германии, описавшие в связи с этим так называемый обращённый эффект Зеемана.

Приведённая нами страничка из истории первых шагов атомной физики хорошо иллюстрирует активное участие русских учёных в мировом научном прогрессе.

Борис Львович Розинг (1869—1933), впоследствии пионер телевидения (патент на способ электрической передачи изображения на расстояние заявлен им 25 июня 1907 г.), в рассматриваемый нами период сделал существенное научное открытие.

В 1894 г. (журнал Русск. физ.-хим. о-ва, 26, стр. 253) он поместил статью, в которой описывались произведённые им весной 1893 г. в лаборатории эксперименты по магнитоотрикции в циклических магнитных полях. При этом он обнаружил гистерезис в изменениях длины железных проволок, помещённых в циклически меняющееся магнитное поле. Аналогичное открытие было сделано в том же 1894 г. японским физиком Нагаоки.

В только что открывшемся в 1899 г. Электротехническом институте профессором физики был В. В. Скобелев (отец нынешнего крупного советского физика Дмитрия Владимировича Скобелевича), доцентом электротехники — выдающийся советский электрик Михаил Андреевич Шателен, профессором физической химии — Николай Семёнович Курнаков (1860—1941) — будущий академик, исследователь физики и химии сплавов, создавший свой оригинальный метод физико-химического анализа. В Электротехнический институт в том же 1900 г. был приглашён профессором физики Александр Степанович Попов, биография и деятельность которого описаны в четвёртой главе.

На Высших женских курсах, открытых в 1889 г., и в Медицинской академии читал физику С. Я. Терешин — автор учебника по физике. В 1889 г., исследуя по методу Зильва диэлектрические постоянные жидкостей, он нашёл для этилового алкоголя $\epsilon = 27,0$, для воды $\epsilon = 83,8$, подтвердив тем самым найденные в 1888 г. Коноя и Аронсом эти аномально-большие значения, как казалось противоречащие теории Максвелла.

На Высших женских курсах вёл практические занятия по физике будущий известный советский академик Владимир Фёдорович Миткевич.

В старейшем высшем учебном заведении Петербурга — Горном институте физику и электротехнику преподавал М. А. Шателен, ассистентом которого был В. Ф. Миткевич. Адыонкт-профессором по кристаллографии был один из замечательных деятелей русской и мировой науки Евграф Степанович Фёдоров.

Е. С. Фёдоров. Евграф Степанович Фёдоров родился в Оренбурге 10 декабря 1853 г. В 1869 г. он, ещё не окончив II военную гимназию, блестяще сдал конкурсный экзамен в Петербургское военное инженерное училище. В 1872 г. подпоручик саперного батальона Фёдоров отправляется к месту службы на Украину. Однако его захватили те течения, которые владели умами тогдашней передовой русской молодёжи: служение народу и естествознание. В 1874 г. Фёдоров уходит в отставку и становится вольнослушателем Военно-медицинской академии.

Отсутствие у него аттестата классической гимназии помешало ему стать студентом-медиком, и он поступает в Технологический институт, где изучает физику и химию и, вступает в народовольческую организацию.

По заданию организации Фёдоров в 1877 г. едет в заграничную командировку для установления связей с революционными организациями Франции, Бельгии и Германии. За границей он работает рабочим (наборщиком, носильщиком, молотобойцем). В его квартире в Петербурге организуется подпольная типография, в которой печатается нелегальная газета, сначала «Начало», потом «Земля и воля».

Изучение марксистской литературы приводит его к постепенному отходу от народников, однако расправы над народовольцами после убийства Александра II он избежал чисто случайно.

Увлечение кристаллографией и математикой, результатом которого явилась первая крупная научная работа Фёдорова «Начала учения о фигурах», заставило его поступить в 1880 г. на третий курс Горного института. Однако

ни минеролог, ни знаменитый математик Чебышев не оценили труда Фёдорова, законченного им ещё в 1879 г., и только выдающийся кристаллограф академик А. В. Гадолин понял значение работы Фёдорова и при его содействии она увидела свет в 1885 г.

Курс института Фёдоров окончил первым, имя его было занесено на мраморную доску. Но кафедра кристаллографии и минералогии не оставила молодого учёного для подготовки к профессорскому званию. Фёдоров выводил кристаллографию из состояния чисто описательной науки, и это было чуждо и непонятно для тогдашних представителей этой науки.

Фёдорову, обременённому семьёй, приходится пройти трудный жизненный путь, наполненный заботами о куске хлеба. Шесть лет он участвует в тяжёлых по условиям работы экспедициях по исследованию Северного Урала, обследовав огромную площадь около 60 000 кв. км.

По возвращении в Петербург он десять лет работает делопроизводителем и консерватором Геологического комитета с окладом 75 руб. в месяц. И, несмотря на эти исключительно тяжёлые условия жизни, Фёдоров продолжает напряжённо работать в избранной им науке.

В 1890 г. выходит его фундаментальный труд «Симметрия правильных систем фигур», завершающий ряд работ его в этом направлении. Здесь впервые в мире установлены принципы классификации пространственных групп, заложены основы современной теоретической кристаллографии.

Он доказал теоретически существование 230 пространственных групп, т. е. 230 типов геометрического расположения атомов в кристаллах. Позднейшее развитие рентгеноструктурного анализа показало, что законы Фёдорова лежат в основе всех реальных кристаллических структур.

Когда после 1912 г. в результате работ Лауэ, У. Л. и В. Л. Бреггов были получены первые расшифровки кристаллических структур, Фёдоров подобно Менделееву писал: «Не могу воздержаться от заявления, что я никак не думал дожить до действительного определения расположения атомов в кристаллах, предусмотренного в прежних моих сочинениях. В письме к профессору Гроту я писал, что, пожалуй, детальные применения



Е. С. Фёдоров

систем, предусмотренных в этих сочинениях, начнут совершаться ещё через сто лет»¹.

Во время своих основополагающих работ Фёдоров не располагал рентгеновскими лучами для исследования кристаллов; в его распоряжении были только средства, основанные на исследовании внешней формы кристаллов. Он усовершенствовал методику оптического изучения кристаллических форм, сконструировав знаменитый «фёдоровский столик» для микроскопа и двукружный гониометр. Свои открытия в области экспериментального исследования кристаллических форм Фёдоров описал в монографии «Теодолитный метод в минералогии и петрографии» (1893).

Но все эти замечательные открытия не были оценены царской Академией наук; представленные им работы не были премированы, и ему пришлось разделить участь Менделеева, Столетова и других славных русских учёных, когда была забаллотирована его кандидатура в Академию наук, несмотря на поддержку такого авторитета в кристаллографии, как П. Грот. «В результате этого забракования,— писал Фёдоров (ввиду подрастания детей),— я дальше не мог уделить своего времени (нечем кормить детей) науке и в 1894 г., ровно в 25-й год своей научной деятельности, должен был уехать на Урал в качестве практического инженера»².

В 1895 г. из Богословского округа на Урале Фёдорова приглашают в Московский сельскохозяйственный институт профессором геологии. Москва, таким образом, первая признала научные заслуги Фёдорова. В 1896 г. его избирают членом Баварской академии наук и профессором Петербургского горного института, куда он приезжал два раза в неделю. В 1901 г. Академия наук избирает Фёдорова адъюнктом. Было бы, однако, напрасно думать, что свободолюбивый Фёдоров мог ужиться в царской академии. Когда академические чиновники стали чинить ему препятствия в организации минералогического института, он подал в отставку. В письме об отставке на имя президента Академии великого князя Константина Романова Фёдоров писал:

«Ваше императорское высочество изволили видеть, что моя попытка (организации Минералогического института.— П. К.) вызвала со стороны Академии обратную попытку запачкать моё имя, побудив меня принять участие в противозаконном дележе казённого пирога. Такова пропасть в воззрениях, целях, задачах скромных людей науки, подобно мне, и господ академиков, важных представителей нашей бюрократии, которая каз своих выдающихся представителей выдвигала Биронов, Аракчеевых, Дмитрия Толстого, Плеве. Не могу допустить для себя чести принадлежать к этому сословию, почему я решаюсь всепокорнейше просить Ваше императорское высочество дать моему прошению об увольнении из Академии законный ход и считать меня окончательно выбывшим из числа академиков не только без оставления в какой-либо должности, но даже без всякого звания, которое могло бы напоминать мне об Академии и тем отравлять духовный покой, столь необходимый в последние годы научной деятельности»³.

Фёдоров вернулся в Академию в 1919 г., в годы советской власти, и этот приход символизировал, что для Академии, как и для всей русской науки, наступила новая эпоха, навсегда покончившая с позорными страницами прошлого. Умер Евграф Степанович 21 мая 1919 г.

¹ «Научное наследство», т. II, АН СССР, 1951, стр. 298—299.

² Е. С. Фёдоров. Симметрия кристаллов, АН СССР, 1944, стр. 561.

³ «Люди русской науки», т. I, Гостехиздат, 1948, стр. 433—434.

Ненавидя самодержавный строй, презирая царских чиновников от науки и просвещения, Фёдоров был вместе с тем горячим патриотом своего отечества. В этом отношении характерно его выступление 1891 г. «по поводу появившегося сочинения Шенфлиса по теоретической кристаллографии». Шенфлис — немецкий математик, несколько позже Фёдорова пришедший к тем же результатам, и признавший в своей книге и письмах к Фёдорову его приоритет. Вот что, между прочим, говорит в этом выступлении Фёдоров:

«Мне кажется общеизвестным то особенное отношение иностранных учёных к русским сочинениям, которое признаёт их как бы несуществующими. Это отрицательное отношение иностранных учёных иногда доходит до того, что некоторые из них не считают для себя обязательным даже установление новых зоологических видов, хотя бы при этом установлении было исполнено всё, что требуется по международным правилам, т. е. сделано удовлетворительное изображение и описание, если только описание это составлено по-русски. Мне всегда казалось обидным для национального самолюбия такое подчинённое отношение русской учёной литературы.

Конечно, в настоящее время общепринятыми языками в научной литературе является язык французский, немецкий и английский, а потому общедоступным может считаться лишь сочинение, написанное на одном из этих языков. Но, кажется, нетрудно предвидеть, что это должно перемениться, что если такую значительную роль могут играть языки французский и немецкий, то тем более важная роль предстоит языку русскому, на котором говорят сто миллионов граждан России, движущейся быстрыми шагами по пути цивилизации и прогресса» (подчёркнуто мной.—П. К.)¹.

Обратимся теперь к Петербургской академии наук. В 1900 г. физика в ней была представлена геофизиками Михаилом Александровичем Рыкачёвым и Борисом Борисовичем Голицыным. В истории физики рассматриваемого периода труды Б. Б. Голицына занимают видное место.

Происходивший из старинного княжеского рода Б. Б. Голицын родился в Петербурге 2 марта 1862 г. В 1880 г. он окончил Морской кадетский корпус с занесением на золотую доску. После заграничного плавания он возвращается в 1881 г. в Петербург и готовится к поступлению в Морскую академию. Болезнь вынуждает его прервать подготовку и уехать за границу. В 1884 г. он возвращается в Петербург и поступает на гидрографическое отделение Морской академии. Академию он оканчивает в 1886 г. с занесением на золотую доску.

Желая получить физико-математическое образование, Голицын намеревается поступить в университет. Здесь перед ним встретилось то же препятствие, что и перед П. Н. Лебедевым — отсутствие аттестата классической гимназии. Так же как Лебедев (с которым они потом находились в тесных дружеских отношениях), он едет в Страсбург к Кундту: здесь он живет и работает вместе с Лебедевым. Страсбургский университет он окончил в 1890 г. Здесь же он сдал докторский экзамен и написал диссертацию «О законе Дальтона». Кроме этой работы, он выполнил в Страсбурге ещё две работы: «О влиянии кривизны поверхности жидкости на упругость насыщенного пара» и «О радиусе действия молекулярных сил». Вернувшись из Страсбурга, Голицын сдает магистерский экзамен при Петербургском университете и осенью 1891 г. назначается приват-доцентом в Московский университет. Мы уже знаем, что здесь Голицын подготовил диссертацию «Ис-

¹ «Научное наследство», т. II, стр. 312.

следования по математической физике», первая часть которой была посвящена термодинамической теории диэлектриков, вторая — законам излучения. Нам известна также и судьба этой диссертации. Голицын взял её и уехал в Страсбург.

Осенью 1893 г. он получает кафедру в Юрьеве и в том же году избирается в адъюнкты по физике в Академию наук. Конечно, избрание в Академию Голицына, прошедшее по инициативе и под нажимом президента Академии Константина Романова, бывшего вахтенного мишмана «герцога Эдинбургского», на котором когда-то плавал Голицын, не могло быть встречено сочувственно научной общественностью. Однако Голицын начал интенсивно работать, привёл в порядок физический кабинет, купил новые приборы, в том числе ступенчатый эшелон Майкельсона и роуландовскую решётку, с которыми провёл ряд теоретических и экспериментальных исследований. В 1896 г. он проводил физико-математические наблюдения на Новой Земле, куда ездил с экспедицией по наблюдению солнечного затмения 9 августа 1896 г., проводил исследования по критическому состоянию.

В последующие годы Голицын перешёл к сейсмометрии, в развитии которой им был сделан фундаментальный вклад. Из чисто физических работ к этому времени относится экспериментальное подтверждение опытов Белопольского (1900) по эффекту Допплера (1907).

Умер Голицын в 1915 г.

Д. И. Менделеев. В Петербурге в конце XIX в. существовало ещё одно научное учреждение: Главная палата мер и весов, президентом которой в 1900 г. был Дмитрий Иванович Менделеев — генеральный русский химик.

Д. И. Менделеев родился 27 января, 1834 г. в г. Тобольске в семье учителя Тобольской гимназии. Отца он лишился в возрасте 13 лет и всем своим дальнейшим воспитанием обязан матери, которую любил и почитал. Высшее образование Менделеев получил в Петербургском главном педагогическом институте, который окончил в 1855 г. с золотой медалью. В числе учителей Менделеева по институту были академики: математик М. В. Остроградский и физик Э. Х. Ленц. После института Менделеев работает преподавателем в Симферополе, а затем в Одесской гимназии при лицее Ришелье. В мае 1856 г. он сдает магистерский экзамен, а в сентябре защищает диссертацию «Об удельных объёмах». В 1857 г. он был утверждён доцентом Петербургского университета, а в 1859 г. отправился в Гейдельберг в заграничную командировку. Менделеев хотел начать экспериментальную работу у знаменитого Бунзена в Гейдельберге, но скоро убедился, что делать ему у Бунзена нечего: «... ничего-то мне там необходимого нет в этой лаборатории, даже весы и те куда как плоховаты»¹. Устроив у себя дома лабораторию, он выполняет своё знаменитое исследование «О сцеплении некоторых жидкостей и об отношении частичного сцепления к химической реакции», которое было опубликовано в «Химическом журнале» и «Горном журнале» за 1860 г. В этом исследовании Менделеев сделал выдающееся открытие «абсолютной температуры кипения», т. е. критической температуры. «Мне совершенно неожиданно удалось достичь общего результата, посредством которого этот совершенно неизвестный вопрос можно считать решённым»,² — так писал об этом Менделеев.

В 1860 г. Менделеев был членом конгресса химиков в Карлсруэ, на котором вместе с итальянским химиком Канниццаро отстаивал имевшую

¹ «Научное наследство», т. II, стр. 343.

² М. Н. Младенцев, Д. И. Менделеев, М., 1937, стр. 5.

важное значение для развития атомистики гипотезу Авогадро-Жерара. С этого момента, писал Менделеев, «истина в виде закона Авогадро-Жерара, при посредстве конгресса, получила более широкое распространение и скоро затем покорила все умы».

Последствия этого факта были огромны, правильные значения атомных весов дали возможность Менделееву открыть свой великий закон.

Вернувшись из-за границы в 1861 г., Менделеев начал читать курс органической химии в университете. Однако его материальное положение было очень шатким (жалованья в университете он не получал). Менделеев строит всякие планы, думает переехать в Москву, в Сельскохозяйственную академию, преподает во II кадетском корпусе, принимается за литературную работу: готовит к изданию «Технологию по Вагнеру» и «Органическую химию».

Осенью в Петербургском университете вспыхнули студенческие волнения в связи с введением новых дисциплинарных правил и всеобщей платы за обучение. Волнения начались большой студенческой сходкой 23 сентября. В записной книжке Менделеева под этим числом имеется запись о сходке и о том, что «правительство развязало руки стрелять по всем, бить, колоть — лишь только соберётся скопище. Их не спросят, чего они хотят, их не будут слушать, им только велят, ударивши три раза в барабан, разойтись и потом по воле начальника военной силы какое хотят оружие, то и употребят, и ответственности нет никакой. Ужасные дела! Невероятно, как это прошло через руки министров и государя в наше время. Печаль, тоска, омерзение! Патруль и тот может делать, что хочет».

Запись заканчивается описанием сходки и приезда попечителя: «После попечитель приехал и рассерженный) долго расхаживал по зале со Срезневским (ректором. — П. К.), видел ералаш стульев, видел разломанные стулья, и тут долж(но) быть решилась участь многих. Жаль, душевно жаль молодёжи, погибнут многие»¹.

В записи от 24 сентября Менделеев сообщает о закрытии университета и о том, что всем профессорам велено явиться к министру: «Я не пошёл, ибо это официаль(ная) явка такая, каких я не терплю... высказаться, быть на виду и из-за чего. Да нехай его, нужно меня — найдут теперь, а не я их буду искать. Ведь и он, поди, подписывал протоколы о стрельбе и т. п.»².

Когда в октябре в связи с введением новых матрикул (зачётных книжек) студенты стали их рвать, отказываясь подчиниться новым правилам, правительство учинило над ними зверскую расправу, прислав в университет солдат. Описывая в дневнике эту расправу, злорадство реакционных профессоров, Менделеев пишет о заключительном акте драмы:

«Народу собралось много — всё больше мужики с биржи должно быть. Тут произошла сцена, которой тягостнее я и не видел, разве что припомнить впечатление обозов раненых, которых везли из Севастополя.

Выводят студентов, окружённых огромным количеством солдат, — так что студентов и не видать — они идут в середине каре. Стоящие вблизи студенты прощай кричат, машут платками. Те отвечают тем же. В это время, о срам и мерзость, ведь и с преступниками позволено прощаться! — наскакивает сперва один взвод, потом другой взвод жандармов — топчет, давит, рубит, окружает. Это дело двух секунд. 3 или 4 раненых. Недоставало крови — теперь она на них лежит пятном, которого не смоят. Обуяет внутри мерзость какая-то. Видишь себя бессильным, слабым...

¹ «Научное наследство», т. II, стр. 171.

² Там же, стр. 172.

... Взволнованный, убитый всеми этими мыслями — иду, чтобы подать в отставку. В профессорской комнате написал прошение к ректору об отставке. Там Сухомлинов, Срезнев(ский) — все об законности толкуют — беда, право, помешались они на ней. И какая тут законность, когда полиция противозаконничает перед нашими глазами»¹.

Ректор Плетнёв отставки не принял, учитель Менделеева Воскресенский и другие профессора уговорили его взять прошение: «Скверное время, низкое время — всё чахлое какое-то, кроме молодёжи».

В эти месяцы Менделеев много думает о своей жизни, и даже накануне Нового 1862 г. думает было оставить науку и завести завод. «Одно соблазняет сильно: хочется к народу стать ближе — это нынче модная фраза, да ведь я не модник. Нет, мне просто вольно с ним, с этим народом — я и говорю как-то свободнее, и меня понимает тут и ребёнок, мне весело с ними, к ним душа лежит»².

Менделеев много внимания уделяет промышленности, в особенности нефтяной, издаёт техническую энциклопедию. До 1863 г. он занимается преподавательской деятельностью в военных и инженерных учебных заведениях. 19 декабря 1863 г. он избирается профессором химии Технологического института. В 1865 г. он защищает докторскую диссертацию «О соединении спирта с водою» и избирается профессором университета по технической химии. В 1867 г. он переходит на кафедру неорганической химии, после ухода проф. А. А. Воскресенского на должность попечителя Харьковского округа. С этого времени начинается его работа над созданием своей знаменитой книги «Основы химии», в процессе которой он открыл периодический закон.

«... Писать начал, когда после ухода Воскресенского начал читать неорганическую химию в университете и когда, перебрав все химии, не нашёл, что следует рекомендовать студентам. Писать заставляли и многие друзья, например Флоринский, Бородин».

«Писавши, изучил многое, например редкие земли. Начал писать в 1868 г. Вышло всего 4 выпуска, и когда в 1871 г. выходил последний, первого уже не было. Так как издавал сам, то получились средства, а потом эта книга дала мне главный побочный доход новым изданием. Тут много самостоятельного в мелочах, а главное периодическая зависимость элементов, найдённая именно при обработке»³.

Создание «Основ химии» и тесно связанное с ним открытие периодической системы элементов было вершиной научного творчества Менделеева. Но, достигнув этой вершины, Менделеев не почил на лаврах, наоборот — с неукротимой энергией он принимается за разрешение самых разнообразных проблем науки и техники.

Размах его деятельности поистине богатырский. Менделеев — это Ломоносов конца XIX в. Подобно Ломоносову, он не замыкается в рамках химии и физики, а выходит далеко за их границы. Его интересуют проблемы воздухоплавания, проблемы разработки недр (нефть, идея подземной газификации угля), проблемы химической промышленности, проблемы метеорологии. Подобно Ломоносову, его горячо интересует, проблема Севера, и он разрабатывал совместно с адмиралом Макаровым проект полярной экспедиции на только что построенном в 1899 г. ледоколе «Ермак». Как и Ломоносова, его волнует вопрос «о размножении и сохранении рос-

¹ «Научное наследство», т. II, стр. 190—191.

² М. Н. Младенцев, Д. И. Менделеев, стр. 6.

³ Там же, стр. 8.

сийского народа», и он пишет «Заветные мысли» и «К познанию России». Огромное научное и литературное наследство Менделеева составляет 25 томов. Из этого обширного наследия мы рассмотрим здесь только некоторые, имеющие важное значение для истории физики.

В 1875 г. вышел в свет первый том обширного труда Менделеева «Об упругости газов». В нём обобщены исследования Менделеева по сжимаемости воздуха в интервале от 650 мм до 5 мм давления ртутного столба. Для этой цели Менделеев сконструировал оригинальный прибор (рис. 181). Сосуд *A*, который может заполняться ртутью из резервуара *E*, соединяется с ртутным краном *M* и манометром *mn*. В колене *z* манометра ртуть поддерживается на одном уровне (до нанесённой отметки) приливанием ртути через воронку *R* или ее отливанием через кран *T*. Кран *M* действует поднятием или опусканием трубки *XU*. Если кран открыт (что достигается опусканием трубки *XU*), то через кран *P* в трубку *OM* и затем в *ch* и сосуд *A* впускается воздух (или другой испытуемый газ).

При этом уровень ртути в колене *N* манометрической трубки стоит выше, чем в *Z*, на величину барометрического давления. Поднимая трубку *XU*, запирают кран *M* (в «кс») и отключают газ в *A* от наружного пространства. Определяют давление P_1 по манометру и объём v_1 газа в соединительных трубках (кс и *ahb*) и в *A*. Затем, открывая кран *c*, выливают часть ртути из *A* и её взвешиванием определяют новый объём v_2 , отсчитывая давление P_2 .

Таким образом Менделеев установил, что воздух в пределах от 650 мм до 5 мм сжимается меньше, чем по закону Бойля-Мариотта ($pv = \text{const}$), тогда как в 1873 г. Сильестром нашёл, что воздух следует тем точнее закону Бойля-Мариотта, чем ниже давление.

Эти исследования обратили внимание Энгельса, который писал в Анти-Дюринге:

«Таким образом, оказалось, что закон Бойля верен только в известных пределах. Но абсолютно ли, окончательно ли верен он в этих пределах? Ни один физик не станет утверждать этого. Он скажет, что закон действителен только в известных пределах давления и температуры и для известных газов, и он не станет отрицать возможность того, что в рамках этих узких границ придётся произвести ещё новые ограничения или придётся вообще изменить формулировку закона». В этом месте Энгельс делает примечание:

«С тех пор, как я написал эти строки, мои слова, повидимому, уже подтвердились. Согласно новейшим исследованиям Менделеева и Богуского, произведённых с помощью более точных аппаратов (добавим — сконструированных самим Менделеевым. — П. К.), было найдено, что все истинные газы обнаруживают изменяющееся отношение между давлением и объёмом;

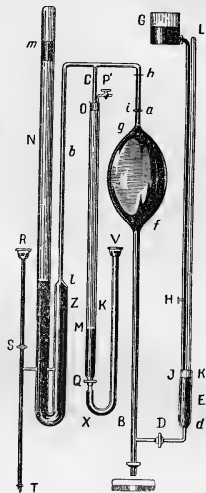


Рис. 181. Прибор Менделеева для измерения сжимаемости газов

у водорода коэффициент расширения оказался при всех применяемых до сих пор давлениях положительным (объём уменьшался медленнее, чем увеличивалось давление); у атмосферного воздуха и у других исследованных газов была обнаружена для каждого газа нулевая точка давления, так что при меньшем давлении указанный коэффициент положителен, при большем отрицателен. Следовательно, закон Бойля, до сих пор всё ещё практически пригодный, нуждается в дополнениях целым рядом специальных законов.

«Теперь — в 1885 г. — мы знаем, что вообще не существует никаких «истинных» газов. Все они были приведены в капельно-жидкое состояние, — писал Энгельс в «Анти-Дюринге»¹.

Таким образом, замечательные исследования Менделеева послужили для Энгельса материалом для важнейших обобщений марксистской теории познания, о том, что «познание вещей по самой своей природе должно оставаться относительным для длинного ряда поколений и лишь постепенно достигать завершения, или даже должно навсегда остаться неполным и незаконченным уже вследствие недостаточности исторического материала, подобно космогонии, геологии и истории человечества»,² короче говоря — о соотношении между относительной и абсолютной истиной. Эти положения Энгельса получили дальнейшее развитие в ленинской теории познания.

В 1876 г. Менделеев написал работу «О барометрическом нивелировании и применении для него высотометра». Высотометр сконструирован самим Менделеевым.

В 1879 г. вышел труд Менделеева «О сопротивлении жидкостей и о воздухоплавании», высоко оценённый Н. Е. Жуковским.

В 1887 г. вышло классическое физико-химическое исследование Менделеева — «Исследование водных растворов по удельному весу», стоившее ему много труда. Свой классический труд он посвятил горячо любимой матери.

В процессе работы над этим исследованием Менделеев изучил всю литературу о растворах более чем за 100 лет, исследовал растворы 233 химических соединений, провёл обширные и утомительные вычисления. В качестве примера приведём некоторые из результатов Менделеева. Для весового количества вещества S , растворённого в 100 весовых частях растворителя, он нашёл такие формулы:

Для раствора KNO_3 в воде

$$S = 13,3 + 0,574t + 0,0174t^2 + 0,0000036t^3$$

(t — температура раствора). Для раствора $NaCl$ в воде в интервале от 0 до 10° Менделеев нашёл, что

$$S = 85,7 + 0,024t + 0,0002t^2.$$

Обобщающий вывод Менделеева: «Растворы суть жидкости, находящиеся в условиях подвижного равновесия и смены... Растворы суть химические соединения, определяемые силами, действующими между растворителем и твёрдым телом».

Этот свой вывод Менделеев основывал на открытом им факте, что приращение удельного веса при изменении состава растворов в определённых «особых точках» испытывает скачки. «Теперь мне уже ясно и уже несомненно, что растворы управляются обычными законами химического

¹ Ф. Энгельс, Анти-Дюринг, 1953, стр. 87.

² Там же, стр. 85.

взаимодействия, что в них те же определённые соединения, которыми так сильна химия, что здесь, несмотря на кажущуюся последовательность изменения свойств, существуют свои скачки, свои разрывы сплошности».

Через два года Менделеев получает приглашение в Лондон для прочтения фарадеевских лекций. Он прочитал лекцию «Периодическая законность химических элементов» и вторую лекцию («сюжет — почти назначили») — «Попытка применения к химии одного из начал Ньютона».

В следующем, 1890 г. Менделеев подал в университете в отставку. История этой — как и первой несостоявшейся отставки — связана со студенческим вопросом. Реакционная политика правительства, на сей раз проводимая в области просвещения Деляновым, привела к студенческим «беспорядкам». На студенческой сходке присутствовал и Менделеев. Студенты выработали петицию, которую нужно было передать министру, и попросили сделать это Менделеева, Менделеев согласился. Петиция была им доставлена лично Делянову, который не читая возвратил её Менделееву с надписью: «По приказанию министра народного просвещения прилагаемая бумага возвращается действительному статскому советнику, профессору Менделееву, так как ни министр и никто из состоящих на службе его императорского величества лиц не имеет права принимать подобные бумаги».

Менделеев подал в отставку. Известие о его уходе, об отказе Делянова принять петицию вызвало в университете волнения. Болея душой за судьбу молодёжи, Менделеев закончил последнюю лекцию словами: «Покорнейше прошу не сопровождать моего ухода аплодисментами по множеству различных причин».

Подводя итоги своей педагогической деятельности, Менделеев писал: «Как педагог, я клал в дело и возбуждение и душу, а о том, что небесплодно, свидетельствовало множество свободных, независимых и зрелых людей. Ко мне в аудиторию ломились не ради красных слов, а ради мыслей».

Теперь, как и тридцать лет назад, перед Менделеевым вновь встал вопрос: что делать дальше? Тяжело и мучительно переживал он свой вынужденный уход из университета, он никого не принимал, замкнувшись в кабинете со своими горькими мыслями. Но его кипучая натура не могла долго оставаться в бездействии, и вскоре Менделеев со всей присущей энергией принялся за разработку проблемы бездымного пороха и других научно-технических вопросов. В развитии промышленности Менделеев видел главную задачу России: «Истинный завет Петра Великого состоит именно в том, чтобы нашу страну, богатую землёй, народом и хлебом, сделать богатой в промышленном смысле, потому что это есть единственный путь для умножения блага народного и для удовлетворения его стремлений к просвещению, прогрессу и миру во всём мире».

В этих замечательных словах, так перекликающихся с нашей современностью, виден горячий патриот своей родины и вновь ощущается духовное родство Менделеева с своим великим предшественником — Ломоносовым.

В 1892 г. Менделеев был приглашён в Депо образцовых мер и весов и под его руководством это учреждение было реорганизовано в 1893 г. в Главную палату мер и весов. В 1894 г. он основывает журнал «Временник Главной палаты мер и весов». Здесь печатаются его труды: «О весе литра воздуха» (1894), «Вес определённого объёма воды», «Об изменении удельного веса воды от 0 до 30°», «Ход работ по возобновлению пустотников», «О приёмах точных взвешиваний» (1895).

Очень скоро в курсы физики вошли выработанные Менделеевым приёмы точного взвешивания. Далее последовали его работы «О колебании весов» (1899), — результат его пятилетних исследований. Менделеев указывал,

что наблюдения качаний весов могут послужить и для изучения колебаний: «Точные весы, медленно колеблясь, соответствуют (по времени размахов в 30, 40, даже 60 секунд) простому маятнику длиной в 1, 2, 3 версты, т. е. столь длинному, что с ним нельзя произвести прямого и точного опыта. С весами же, когда всё уже устроено для точнейших взвешиваний, сравнительно легко точно наблюдать законы колебаний»¹. Менделеев сконструировал в связи со своим исследованием ряд маятников: 1) дифференциальный маятник для определения твёрдости вещества (по периоду и декременту затухания), 2) «маятник — маховое колесо» для исследования трения в подшипнике, 3) «маятник — метроном», 4) «маятник — весы», 5) маятник, который может заменить маятник различной длины. И в этих своих поисках Менделеев идёт по стопам Ломоносова, конструировавшего «пендулы» для изучения напряжения тяжести. Менделеев также не прошёл мимо этой проблемы, его влекли к ней не только практические потребности метрологии, но и те же глубокие причины, которые в своё время волновали Ломоносова.

«Коренные успехи в постижении других сил природы мало вероятны, пока не выяснится опытным исследованием основная сила...», под которой Менделеев понимает силу тяжести. Он проводит огромную подготовительную работу к измерениям тяжести: исследует влияние трения в точках подвеса, способы подвешивания и массы, вопросы устранения вредных влияний и т. д. В результате была разработана грандиозная установка с железной трубой высотой 36,5 м, опущенная в землю на 16,5 м, окружённая двойными стенками, пространство между которыми заполнялось водой, переливаемой насосом. В трубе поддерживалось таким образом постоянство температуры до 0°,1 в сутки, а в подземной части до 0°,01. В этой трубе предполагалось использовать маятники различной длины — 36,5 и 21 м. Кроме того, была приготовлена труба высотой 4 м для наблюдений с маятниками в 4 и 0,5 м. Маятники должны были качаться в разреженном пространстве и различных газах. Смерть Менделеева (20 января ст. ст. 1907 г.) прервала эту работу и помешала осуществлению других его замыслов.

Венец научного творчества Менделеева — периодический закон — открыл новую эпоху в науке. Человечество знает не много книг, делающих эпоху. В области естественных наук в одном ряду с «Началами» Ньютона, «Происхождение видов» Дарвина стоят и «Основы химии» Менделеева. Не обошлось без попыток и умалить славу Менделеева: в числе открывателей закона называли Лотара Мейера и других. Сам Менделеев убедительно показал несостоятельность всех этих притязаний, и закон Менделеева навсегда вошёл под этим именем в историю науки.

«Менделеев, — писал Энгельс, — применив бессознательно гегелевский закон о переходе количества в качество, совершил научный подвиг, который смело можно поставить рядом с открытием Лавуазье, вычислившего орбиту еще неизвестной планеты — Нептуна»².

Как ни высока эта оценка (сравнение с открытием Нептуна мы находим и в цитированном выше письме профессоров Московского университета к Менделееву), развитие науки показало, что она не достаточна. Открытие Нептуна было сделано на основе старой теории и не привело к существенно новому этапу в развитии механики. Менделеев же своим открытием открыл совершенно новую эпоху в развитии науки — эпоху атомной науки.

¹ Н. А. Шостьин, Д. И. Менделеев и проблемы измерения, стр. 149.

² Ф. Энгельс, Диалектика природы, 1952, стр. 43.

Интересно, сознавал ли сам Менделеев, что его открытие выходит за рамки старой атомистики с неизменным атомом — индивидуумом? Думал ли он о возможной структуре атома, о задаче познания этой структуры?

Известно, что к гипотезе Прюта о строении всех атомов из водорода Менделеев относился отрицательно, скептически относился ко всем возникшим в его время гипотезам о сложной, в частности, электрической структуре атома. Это не значит, что он считал атомы неделимыми, не имеющими структуры, нет, — он только считал, что для химика решающим обстоятельством является факт химической индивидуальности элементов, носителями которой являются атомы. Он писал: «...атомы современных естествоиспытателей, неделимые в химическом смысле, составляют те единицы, с которыми имеют дело при рассмотрении естественных явлений вещества, подобно тому как при рассмотрении людьми отношений человека есть неделимая единица, или как в астрономии единицею служат светила, планеты, звёзды»¹.

Такие неделимые индивидуумы не сводятся к простой сумме «первоатомов», а имеют более глубокую и сложную структуру внутренних движений. «При современном состоянии наук, — пишет Менделеев, — динамическая ли или атомическая гипотеза о строении вещества, всякая неизбежно должна допустить в веществе незаметные, невидимые, скрытые от прямого ощущения движения, без которых нельзя понять ни света, ни тепла, ни газового давления, ни большой массы механических, физических и химических данных. Для древнего человека оживотворены движением казались только животные, для нас ныне без самобытного движения немислима ни одна малейшая доля вещества, всякая снабжена живою силою, энергиею в той или другой мере. Таким образом, *движение стало понятием, неразрывно связанным с понятием материи* (подчёркнуто мной. — П. К.), и подготавливалась почва к новому возбуждению динамической гипотезы о строении вещества. В самом атомном учении стала утверждаться всё с большею силою та обобщающая мысль, по которой мир атомов устроен так же, как мир небесных светил, со своими солнцами, планетами и спутниками, одушевлёнными всегдашнею живою силою движения, образующими частицы, как небесные тела образуют системы, подобные солнечной, и неделимыми лишь относительно, как неделимы планеты солнечной системы, и устойчивыми и прочными, как прочна система мира».

В другом месте («Периодическая законность химических элементов», 1872), касаясь гипотезы Прюта, Менделеев пишет: «Как мне кажется, нет никаких твёрдых оснований для принятия этой гипотезы. Если даже допустить, что материя элементов совершенно однородна, нет основания предполагать, что n весовых частей или n атомов одного элемента дадут те же самые n весовых частей, т. е. что атом второго элемента будет в n раз тяжелее первого. Закон сохранения веса можно рассматривать как частный случай закона сохранения силы или движения. Вес естественно приписать особому движению материи, и нет оснований отрицать возможность превращения этого движения при образовании элементарных атомов в химическую энергию или другой вид движения. Два наблюдаемых ныне для элементов явления — постоянство атомного веса и неразлагаемость — стоят в тесной, даже исторической связи; *если поэтому стал бы образовываться новый элемент, или стал бы разлагаться известный элемент, то, может*

¹ Д. И. Менделеев, Основы химии, т. I, стр. 472.

² Там же, стр. 473—474.

быть, эти явления могут сопровождаться увеличением или уменьшением веса (подчёркнуто мной. — П. К.).

Таким образом можно было бы до известной степени объяснить различие химической энергии различных элементов. Высказывая здесь эту мысль, я хочу т о л ь к о (выделено Менделеевым. — П. К.) сказать, что имеется некоторая возможность согласовать тайное мнение химиков о сложной природе элементов с непризнанием гипотезы Прюта¹.

Но это означает, что Менделеев не только признаёт гипотезу внутриатомных движений, гипотезу сложности атома, но из факта неразрывной связи материи и движения делает смелый вывод о выделении энергии при образовании атомов, об изменении веса при образовании или разложении элементов, т. е. предвосхищает законы будущих ядерных реакций. Вот почему мы с полным правом можем причислить Менделеева к числу учёных, предугадавших открытие закона взаимосвязи массы и энергии.

В 1903 г., через тридцать с лишним лет после речи Менделеева о периодической законности, старейший в то время русский химик акад. Николай Николаевич Б е к е т о в (1826—1911) в статье «О химической энергии в связи с явлениями, представленными радием», вполне определённо выскажет идею, что «атомы — скопления наиболее тонкой материи», и чем больше в атоме содержится материи, тем больше связанная с ним энергия.

Уже в XIX столетии делались попытки раскрыть физическое содержание закона Менделеева, исходя из некоторых гипотез о структуре атома. Такова была попытка профессора юридического факультета Б. Н. Ч и ч е р и н а, который в ряде статей, напечатанных в журнале Физико-химического общества, часть химическая, в сложной и запутанной форме развивал идеи о периферическом и центральном строении атома, в которых можно усмотреть прообраз модели Резерфорда. Но рассуждения Чичерина носили спекулятивный характер и, конечно, были встречены Менделеевым скептически, хотя вначале он отнёсся к работам Чичерина с интересом. Более реальный химический характер носят воззрения замечательного русского деятеля революционера-народовольца Николая Александровича М о р о з о в а.

Н. А. М о р о з о в родился 25 июня (7 июля н. ст.) 1854 г. в семье помещика. Мать Морозова была крепостная крестьянка, отец Морозова выписал её из крепостного состояния, сам занимался её образованием и развитием, так что она вскоре после замужества, как вспоминает Морозов, «перечитала всю библиотеку отца, заключавшую томов триста». Мать научила потом читать своего первенца Николая, который также перечитал отцовскую библиотеку и увлёкся стихами Лермонтова и естественными науками.

Поступив во II Московскую классическую гимназию, Морозов продолжал с жадностью читать книги по естествознанию, которые он приобретал «на толкучке», и основал, как он пишет в своей автобиографии, «тайное общество естествоиспытателей гимназистов, так как явные занятия этим предметом тогда преследовались в гимназиях».

Реакционное правительство и министерство просвещения во главе с графом Дмитрием Толстым считали естественные науки «враждебными церковному учению, а с ним и самодержавной власти русских монархов, якобы поставленных самим богом».

Таким образом, гонение на естественные науки сочеталось с борьбой

¹ Д. И. Менделеев, Периодический закон, М., 1926, стр. 117—118.

против «крамолы». Это, вспоминал Морозов, «сразу насторожило меня как против церковных, так и против монархических доктрин. Я начал, кроме естественных научных книг, читать также и имевшиеся в то время истории революционных движений, которые доставал, где только мог». Юноша Морозов понял простую истину, что самодержавный строй царской России был по самому своему существу враждебен науке. Продолжая усиленно заниматься естествознанием, он слушал лекции в Московском университете, работал по праздникам в зоологическом и геологическом музеях университета и вскоре постепенно сблизился с кружком революционеров-народников: Кравчинским, Шишко и другими.

Этот переход от естествознания к революционной деятельности произошёл «постепенно и незаметно». К этому вели «все условия русской жизни», — пишет Морозов. «Когда я впервые прочёл Писарева и Добролюбова, — вспоминал он, — мне казалось, что они выражают лишь мои собственные мысли». После сближения с революционерами перед Морозовым встал вопрос — что делать дальше: идти в науку или в революцию. «Во мне началась страшная борьба между стремлением продолжать свою подготовку к будущей научной деятельности и стремлением идти с ними (участниками кружка) на жизнь и на смерть...»,¹ — пишет Морозов в своей автобиографии об этом переломном периоде своей жизни. Он выбрал революцию, решив, что служение науке несовместимо с пассивным отношением к произволу и насилию.

Морозов участвовал в «хождении в народ», в попытке вместе с Кравчинским и с Лопатиным отбить на улице у жандармов арестованного члена кружка Волховского, затем уехал за границу и там в Женеве участвовал в редактировании журнала «Работник» и сотрудничал в лондонском органе Лаврова «Вперёд». В январе 1875 г. он вернулся в Россию, был арестован на границе, просидел три года в одиночной камере дома предварительного заключения и судился по процессу 192. И на следствии и на суде Морозов отказался давать какие бы то ни было показания. Он был приговорён к тюремному заключению на год с четвертью, и так как этот срок покрывался его предварительным заключением, был освобождён.

После освобождения Морозов продолжал революционную деятельность и стал участником группы «Народная воля». Он активно участвовал в нелегальном журнале «Земля и воля», в издании листовок и прокламаций народовольцев, участвовал в мероприятиях по подготовке взрыва Зимнего дворца Халтуриным. В связи с провалом типографии он был ещё до взрыва отправлен за границу, и о неудаче покушения узнал уже из немецких газет.

За границей Морозов написал брошюру «Террористическая борьба», познакомился в Лондоне с Марксом.



Н. А. Морозов

¹ Н. А. Морозов, Повести моей жизни, т. I. 1947, стр. 68—69.

Об этом свидании Морозов вспоминает так: «Еду в Лондон к К. Марксу просить его для перевода какую-нибудь из своих работ. Он даёт мне несколько, в том числе «Манифест коммунистической партии». Мне навсегда запомнились его прощальные слова: «Желаю вам с победой возвратиться еще раз к нам. Ваш царь, бывший ранее опорой европейской реакции, сидит теперь пленником революции в своем Царском селе».

Вскоре после этого свидания Морозов вернулся нелегально в Россию под именем студента Женевского университета Локьера. На границе он был арестован 28 января 1881 г.

«На суде особого присутствия правительствующего сената я не признал себя виновным ни в чём и до конца держался своего метода — как можно меньше говорить со своими врагами, благодаря чему меня и осудили только на пожизненное заточение в крепость, а тех, кто более или менее подробно описал им свою деятельность, — к смертной казни».

Вскоре после суда ночью толпа жандармов ворвалась в камеру Морозова и потащила его в одной куртке и туфлях бегом по застенкам Петропавловской крепости. Этот бешеный бег, «так что ноги мои едва касались земли», — вспоминал Морозов, по дворам и коридорам крепости означал перевод его в Алексеевский рavelин Петропавловской крепости.

«Началась трёхлетняя пытка посредством недостаточной пищи и отсутствия воздуха, так как нас совсем не выпускали из камер», — пишет Морозов. Из одиннадцати человек, посаженных вместе с Морозовым, осталось к концу третьего года в живых только четыре, а из четырёх «один Арончик уже сошёл с ума и остались только Тригони, Фроленко и я, которых вместе с несколькими другими, приведёнными позднее в рavelин и потому менее пострадавшими, перевезли во вновь отстроенную для нас Шлиссельбургскую крепость»¹.

Революция 1905 года «выбросила меня и моих товарищей из Шлиссельбургской крепости после 25-летнего заточения», и Морозов отдался научной работе, издав прежде всего подготовленные им в Шлиссельбурге труды.

После выхода книги «Периодические системы строения вещества» он был избран приват-доцентом по кафедре химии «Полной высшей школы», а потом профессором аналитической химии, которую он преподавал до закрытия школы правительством.

В 1911 г. Морозов вновь судился за книгу «Звёздные песни» и сидел год в Двинской крепости.

После освобождения Морозов работает в биологической лаборатории Лесгафта и профессором астрономии на Высших курсах Лесгафта. После революции Морозов был директором этой лаборатории, преобразованной при советской власти в Государственный научный институт имени Лесгафта.

29 марта 1932 г. Академия наук СССР избрала Николая Александровича почётным академиком по отделениям химических и физико-математических наук.

Умер Н. А. Морозов в 1946 г. в имении «Борок», которое было закреплено за ним по личному указанию В. И. Ленина. Это имение он передал Академии наук, учредившей там Верхневолжскую научную базу. Постановлением Совета Министров СССР от 1 августа 1946 г. «Об увековечении памяти выдающегося русского учёного в области естествознания, старейшего революционера, почётного члена Академии наук СССР Н. А. Морозова» в этом имении организован музей Н. А. Морозова.

¹ Н. А. Морозов, Повести моей жизни, т. I, стр. 22—23.

Находясь в заключении в Шлиссельбурге, Морозов написал книгу «Периодические системы строения вещества». Книгу эту Морозов написал в 90-х годах, не зная об открытии радиоактивности, и просил министра внутренних дел Горемыкина передать её Менделееву или Бекетову. Начальство не выполнило просьбы Морозова и ограничилось направлением её на просмотр Коновалову с указанием вернуть после просмотра обратно. В связи с этим Морозов писал:

«Как один из самых крайних противников практической разложимости современных химических элементов, Д. П. не убедился моими доводами, но возвратил книгу в департамент полиции с очень лестным отзывом обо мне, как химике. Таким образом, книга снова попала в бессрочное заключение без права иметь какие-либо сообщения с внешним миром. Только октябрьские события 1905 года выбросили её вместе со мной и другими научными работами на свободу...»¹. Она вышла в свет в 1907 г., когда Менделеева уже не было в живых и когда во весь рост стала проблема строения атома, решаемая уже не на химической, а на физической основе. Кто знает, какие открытия мог бы дать науке талантливый Морозов, если бы царское правительство не исковеркало его научное развитие двадцатипятилетним одиночным заключением.

В этой книге, опираясь на цитированное нами положение Менделеева о неделимости атома в химическом смысле, подобно, например, неделимости живого организма, Морозов решает вопрос «о составе атомов у современных металлов и металлоидов из более мелких по своей массе скоплений первоначального вещества, не нарушая этим установленных в настоящее время химических законов».

На основании каких же данных решает Морозов эту задачу? Ему ничего не известно о существовании электронов, о фактах радиоактивности, зато хорошо известен печальный опыт алхимиков, тщетно пытавшихся осуществить искусственное превращение элементов. Морозовым руководит химическая аналогия. Он выписывает группу органических соединений, названную им нулевой группой карбогидридов (углеводорода парафинового ряда), выражаемую формулой $H-(CH_2)_n-H$. Она имеет вид:

Элементы	Обозначения	Вес	Темп. кипения
Метан	$(CH_4) [H-(CH_2)_1-H]$	16	-164°
Этан	$(C_2H_6) [H-(CH_2)_2-H]$	30	-89°,5
Пропан	$(C_3H_8) [H-(CH_2)_3-H]$	44	-27°
Бутан	$(C_4H_{10}) [H-(CH_2)_4-H]$	58	+ 1°
Пентан	$(C_5H_{12}) [H-(CH_2)_5-H]$	72	+ 37°
И т. д.			

и сопоставляет его с рядом элементов нулевой группы:

Элементы	Обозначения	Вес	Темп. кипения
Гелий	He	3,96	7° абс.
Неон	Ne	19,94	
Аргон	Ar	39,92	86°,9
Криптон	Kr	81,76	121°,8
Ксенон	Xe	128	163°,9

«И т. д.», — пишет Морозов.

¹ Н. А. Морозов, Периодические системы строения вещества, М., 1907, стр. XI—XII

Далее Морозов рассматривает другие типы углеводородов и усматривает в них периодически повторяющиеся свойства, обнаруживающие «поразительное сходство» с периодической системой минеральных элементов. В этом обстоятельстве Морозов и находит подтверждение идеи о сложной структуре элементов, подобно тому как устроена молекула органических веществ из одинаковых структурных элементов.

В 1912 г., т. е. спустя семь лет после выхода книги Морозова, которая в свою очередь была написана по крайней мере за 10 лет до её издания, известный английский химик В. Рамзай написал книгу «Элементы и электроны». В этой книге мы между прочим читаем:

«Известно много соединений углерода с водородом, названных углеводородами. Они образуют группы, каждая из которых содержит соединения, аналогичные по физическим и химическим свойствам; члены таких групп называются гомологами, а сами ряды гомологическими рядами». Далее Рамзай приводит в качестве примера ту самую группу гомологов парафинового ряда, с которой начинает Морозов. Затем он продолжает: «Аналогия такого рода рядов с рядами элементов периодической таблицы поразительна (у Морозова «поразительное сходство»), и те и другие отличаются только постольку, поскольку разность между атомными весами «гомологических» элементов не так правильна, а потому и ряды не дают такой закономерности. [У Морозова: «если первая система (карбогидридов. — П. К.) в своём общем виде напоминает новенькую проволочную решётку, едва вышедшую из рук мастера, то вторая, несомненно, напоминает совершенно такую же решётку, сделанную много лет назад и слегка погнутую пережитыми случайностями и непогодами»].¹

«Но сходство достаточно для того, — продолжает Рамзай, — чтобы предположить, что элементы могут быть сложны и построены из более простых веществ наподобие углеводородов». У Морозова же мы читаем: «Сразу очевидно, что такое сходство не может быть случайным, и обе системы должны подчиняться тому же самому структурному закону ... вся периодическая система наших минеральных элементов содержит в себе лишь такие тела, мельчайшие частицы которых, действующие как неделимое, всё-таки сложены ещё из других телесных индивидуумов, ещё более мелких по своей величине, и что эти подчинённые индивидуумы, или податомы, сложены между собой аналогично углероду и водороду в элементарных карбогидридах»².

Мы видим, что аргументация Рамзая в пользу сложности атомов химических элементов буквально повторяет аргументацию Морозова. Вероятно, мы имеем здесь случай прямого заимствования.

В 1907 г. Н. А. Морозов послал В. Круксу, редактору журнала «Новости химии», статью с изложением своих взглядов на строение вещества. Крукс ответил письмом от 4 декабря 1907 г.

«Профессору Морозову.

Свободная высшая школа.

С.-Петербург.

Дорогой сэр!

Я получил Вашу статью своевременно, но, к сожалению, считаю её неподходящей для «Новостей химии». В настоящее время это чистая спекуляция: нет никаких экспериментальных доказательств, подтверждающих эту гипотезу. Кроме того, иллюстрации трудно воспроизвести, и они

¹ В. Рамзай, Элементы и электроны, стр. 68—69.

² Там же, стр. 70.

требуют больших затрат. По Вашей просьбе я посылал её сэру Вильяму Рамзаю. Он прочитал её и вернул мне. Если Вы хотите знать его мнение, то свяжитесь непосредственно с ним.

Прилагаю к настоящему письму Вашу статью и с благодарностью за предоставленную возможность прочитать её остаюсь преданный Вам Вильям Крукс.

Как мы видели, Рамзай воспользовался идеями Морозова, которые, конечно, не были спекуляцией, так как основывались на точном законе и методе аналогии. Что же касается «спекуляции», то тот же Рамзай полагал, что ему удалось превратить воду под действием эманиции радия («нитона») в неон. Правда, он добавлял при этом, что ещё не установлено, является ли неон «продуктом распада нитона или продуктом действия нитона на воду». Спекуляции экспериментаторов, вроде пресловутых *N*-лучей Блондло, печатались беспрепятственно. Гениальным же предвидениям Морозова путь в науку был закрыт.

В качестве структурных элементов атомов Морозов принимает архоний (*Z*) весом 4, полуатома гелия (*X*) с весом 2 и «необязательный для их химической индивидуальности» структурный водород *h* с весом 1. Особенно интересна гипотеза о существовании мельчайших заряжённых частиц анодия и катодия, массы которых настолько малы, что не ощутимы в общей массе атома; они обладают соответственно положительным и отрицательным зарядом и в силу этого большим сродством друг к другу; вступая в соединение, они образуют нейтральную «молекулу католистого анодия». «Очень вероятно, — пишет Морозов, — что католистый анодий и есть не что иное, как то неуловимое вещество, которое составляет светоносную междупланетную среду».

Таков самый ранний вариант теории позитронно-электронного вакуума и прообраз будущего «позитрония».

Любопытно, что построения Морозова позволили сделать ему ряд предсказаний. Когда ещё в 80-х годах он разрабатывал свою аналогию, то тот ряд элементов «нулевой» группы, который мы приводили выше, в таблице Менделеева отсутствовал. Между тем по расчётам Морозова должен быть ряд элементов с теоретически вычисленными атомными весами 4, 20, 36 или 40, 82 и т. д. Его товарищ по заключению Лукашевич указал ему, что если бы его аналогия была правильна, то в этой нулевой колонке, в которой Морозов проставил только теоретические веса, «были бы очень важные элементы, неактивные химически, подобно предельным углеводородам». Морозов ощущал этот недостаток своей теории; так как его гипотеза о недолговечности этих элементов ему самому казалась неосновательной. «Зато велика была моя радость, когда впервые дошла до меня весть об открытии Рамзаем и лордом Реллеем первого вестника из этой недостававшей серии элементов — аргона!»¹, — писал в 1903 г., находясь в Шлиссельбурге, Морозов.

Далее из теории Морозова вытекала возможность разложения тела, с возможным выделением гелия, водорода или неизвестного элемента *Z*. «Здесь действительно можно было возразить, что все факты, добытые химией со времени Лавуазье, не указывали ещё ни одного достоверного случая превращения какого-либо из элементарных тел в другое, при простых химических реакциях», — пишет Морозов. Но вот он знакомится с описанием опытов Резерфорда и Содди (1902), показавших, что радий выделяет некоторый газ; ближайшее определение природы этого газа Рамзаем (1903)

¹ Н. А. Морозов, Периодические системы, стр. 331.

показало, что это гелий. Таким образом, «атомы радия постепенно распадаются на гелий и остаточное вещество».

В том же номере «Knowledge», в котором были описаны опыты Рамзая, была статья Эдсера, в которой были такие выводы: «Нам ничего не остаётся, как предположить, что элемент радия обладает исключительной способностью распадаться на другие элементы, один из которых есть гелий... Может быть, окажется в конце концов, что элементы с большими атомными весами, находящиеся на самом конце менделеевских групп, способны самопроизвольно трансформироваться в элементы другого конца этих групп»¹.

Таким образом, и другая идея Морозова нашла своё подтверждение в фактах современной ему науки.

Открытие в 1897 г. электронов Томсоном так же подтверждало гипотезу Морозова о существовании анодия и катодия, правда, находящихся в разных отношениях к атомам материи: атомы отрицательного электричества (анодий) могут быть в свободном виде, атомы положительного в связанном.

«Нахождение аргона и его аналогов, выделение гелия из атомов радия и обнаружение только что описанных корпускул были тремя важными открытиями, подтвердившими мою структурную теорию после её первого обоснования в 80-х годах XIX века. Всё это даёт мне право надеяться, что она будет подтверждена и в будущем ещё не одним важным открытием, а может быть, и сама наведёт на некоторые из них при своём развитии, когда попадёт на свободу».

Шлиссельбургская крепость. 14 октября 1903 г.²

В какой мере оправдались надежды Морозова? Конечно, мы теперь хорошо знаем, что аналогия Морозова была неглубокой. Силы, связывающие атомы в молекулы, и силы, связывающие нуклоны в ядра, совершенно различны в качественном и количественном отношении. В теории Морозова много фантастики. И всё же остаётся историческим фактом, что Морозов правильно нащупал основные факты атомной физики: существование частиц, меньших атома, превращение атомов. Правильно и его предсказание нулевой группы. Его идея об анодийно-катодийном строении эфира удивительным образом перекликается с современной теорией электронно-позитронного вакуума, его катодийный анодий — прообраз позитрония. Да и открытие структурных групп оболочек внутри ядра в какой-то мере перекликается с циклическими цепями Морозова.

В чём же здесь дело? Мы имеем здесь дело с одним из нередких фактов в истории науки, когда внешняя и даже неправильная аналогия при наличии некоторого правильного общего принципа ведёт к правильному результату.

Таков, например, знаменитый результат Карно, полученный им из неправильной аналогии работы тепла в машине с работой спадающей воды и правильного принципа невозможности вечного двигателя. Максвелл получил свои уравнения, руководясь внешней аналогией между вектор-потенциалом и импульсом и правильно найденным выражением для энергии. Морозов, опираясь на поверхностную аналогию рядов органических элементов и рядов неорганических элементов и правильный закон Менделеева, пришёл к правильным выводам.

Следует также заметить, что идея сложности и трансмутации элементов уже созрела после менделеевского открытия. В этом отношении замеча-

¹ Н. А. Морозов, Периодические системы, стр. 340.

² Там же, стр. 379.

тельна статья Н. Н. Бекетова «О превращении химических элементов», напечатанная в «Научном обозрении» за 1902 г., основные положения которой излагает Морозов в приложениях к своей работе. Задав вопрос о возможности преобразования элементов, Бекетов говорит:

«... Следует сказать, что если бы такие условия и такие явления оказались возможными, то они будут выходить из пределов обыкновенных химических процессов, и потому я твёрдо убеждён, что начала, на которых зиждется современная химия, несколько не поколебались бы, а открылась бы только новая область над атомного, если только можно так выразиться, материального мира».

«Химия собственно изучает взаимные отношения химических атомов, неизменных в пределах химического процесса. Следовательно, дальнейшее исследование над возможностью изменения самих атомов будет уже принадлежать, так сказать, к общему учению о материи, не имеющему непосредственного отношения к химическому составу и строению обыкновенной материи»¹.

Так чётко и ясно разграничивает Бекетов задачи будущей атомной физики и химии.

Однако при всей специфичности ядерных процессов, отличающих их от химических, мы, указывает Бекетов, «и здесь должны руководствоваться тем, что нам известно о материи и энергии».

И, опираясь на этот правильный принцип, Бекетов делает замечательное предвидение, полностью оправдавшееся в наши дни:

«... Мы до некоторой степени вправе предположить, что, если и сами элементы образовались из какой-либо первичной материи, например эфира, или из какого-нибудь вещества, среднего между эфиром и настоящей материей, как теперь некоторые думают, то при этом должна была произойти потеря энергии, и что поэтому присущая в настоящее время элементам химическая энергия есть только слабый остаток того запаса живой силы, которым обладала эта первичная материя».

«Такое предположение объяснило бы необыкновенную прочность химических атомов, так как для их разложения потребовалось бы применить к ним такую интенсивную по количеству энергию, какой к ним ещё не было применено»² (подчёркнуто мной. — П. К.).

Бекетов указывает далее два возможных способа изменения элементов: первый — путём приложения к ним наиболее интенсивной энергии, например электрической высокого напряжения, с помощью которого можно было бы «возвратить составляющим атомы первичным частичкам ту живую силу, которую они утратили при образовании «весомой» материи. Следствием такого приёма было бы, конечно, уничтожение весомой материи, в чём можно было бы удостовериться с помощью весов».

Второй способ «имел бы целью уже не диссоциацию элементов, а, наоборот, при потере ими энергии их уплотнение, а следовательно, и возможность попытки превратить один элемент в другой...». «...можно предположить, что, произведя искусственное сближение частиц элементов с помощью возможно высокого давления, можно вызвать необходимую для образования другого элемента потерю энергии».

¹ Н. А. Морозов, Периодические системы, стр. 382.

² Там же, стр. 383.

Здесь Морозов в скобках делает пояснение: «например... синтезировать первоначальный элемент в новый с удвоенным атомным весом»¹.

Так как первоначальный элемент Морозова эквивалентен тяжёлому водороду ($X_1 = 2$), то здесь перед нами в самой осязательной форме изложен принцип водородной бомбы. Правда, и Бекетов и Морозов — здесь уже их подводит химическая аналогия — считают, что уплотнение аналогично сжижению газов и поэтому требует низких температур, но ведь нельзя же требовать от них полного предвидения специфики ядерных превращений. И то, что мы выписали здесь, производит поразительное впечатление, иллюстрируя силу гипотезы и метода аналогий, позволяющих проникать нам в область неизвестного.

Наконец, Морозов останавливается на вопросе о катодах и анодах и их отношении к электронной теории. Здесь Морозов указывает, что, когда он по теоретическим соображениям вводил свои гипотетические корпускулы («атомиизма» по его терминологии), ему «и в голову не приходило, что опытная физика уже стоит накануне одного из величайших открытий, которое должно было сразу преобразовать прежние представления об электрических явлениях, как раз в том смысле, какой указывала моя теория»².

Далее Морозов останавливается на теории Абрагама и экспериментах Кауфмана, причём считает, что интерпретация их как наличие переменной массы с а м и х частиц не обоснована. Он в общем склоняется к полевой теории инерции и высказывает ряд гипотез о превращении частиц при их движении. Заканчивает Морозов свою книгу цитатой из Фарадея: «Разложить металлы, преобразовать их и осуществить, таким образом, идею о превращении веществ, считавшуюся некогда абсурдной — это задача настоящего времени, решить которую обязан химик». «Пожелаем же, — говорит Морозов, — от всего сердца, чтоб эта великая проблема была, наконец, разрешена учёными тех стран, где больше простора для развития научной мысли»³.

Так в стенах Шлиссельбургской крепости пятьдесят лет назад прозвучал призыв к учёным свободной науки раскрыть в интересах человечества тайну атомных превращений. Советские учёные свято выполняют завет того, кто отдал свои молодые силы и годы борьбе за раскрепощение народа и науки.

Физики Киева. После Москвы и Петербурга следующее место в русской физике принадлежит Киеву. После того как в Киевский университет приехал ученик Ленца и друг Столетова Михаил Петрович А в е н а р и у с, там развернулась интенсивная научная и педагогическая работа по физике.

М. П. Авенариус родился 7 сентября (ст. ст.) 1835 г. в семье царско-сельского пастора. После окончания V Петербургской гимназии он поступил на физико-математический факультет Петербургского университета, который и окончил в 1858 г. со степенью кандидата.

Севастопольская эпопея заставила правительство обратить внимание на развитие точных наук в России. Было вынесено решение об отправке за границу для подготовки к профессорской деятельности лиц, окончивших университет; общее наблюдение за ними поручалось знаменитому русскому хирургу Николаю Ивановичу Пирогову. Одним из «пироговцев» был и Авенариус, находившийся с 1862 по 1864 г. в Берлине у проф. Магнуса, где он работал в его одной из первых, если не первой физической лаборатории

¹ Н. А. Морозов, Периодические системы, стр. 385.

² Там же, стр. 399—400.

³ Там же, стр. 437.

в мире. Большинство приборов, необходимых для опытов, ему приходилось приобретать на свой счёт. У Магнуса Авенариус работал по термоэлектричеству. Результатом работы явилась его магистерская диссертация «О термоэлектричестве», напечатанная им в 1864 г. и защищённая 8 января 1865 г. После защиты диссертации он уехал в Киев, куда получил приглашение на кафедру физики после ухода в отставку проф. Талызина. В 1866 г. он защитил докторскую диссертацию «Об электрических разностях металлов при различных температурах», после чего получил звание экстраординарного, а в следующем 1867 г. ординарного профессора.

В своих исследованиях по термоэлектричеству Авенариус нашёл закон зависимости термоэлектродвижущей силы от разности температур:

$$E = a(t - t_0) + b(t^2 - t_0^2).$$



М. П. Авенариус

С 1873 г. Авенариус с группой своих сотрудников начинает свои знаменитые исследования по критическому состоянию. Работать приходилось в тяжёлых условиях, по несколько часов каждый день он проводил «среди зажжённых газовых горелок и накалённых жестяных магнусовских ванн, в невыносимо высокой температуре, в сухой, переполненной углекислотой атмосфере, всё время на ногах, терпеливо следя за показаниями термометров, с карандашом в руке...» В такой обстановке разрушалось здоровье и самого Авенариуса и его сотрудников. Его талантливый ученик А. И. Надеждин (1858—1886), первый в мире определивший критическую температуру воды, умер в 28-летнем возрасте, фундаментальный труд его «Физические исследования» вышел в 1887 г., уже после его смерти. Авенариусу и его ученикам (В. И. Зайончевскому, О. Э. Страусу, А. И. Надеждину, К. Н. Жуку, Н. И. Павловскому, К. Ф. Каппенгагеру, И. С. Дьячевскому) принадлежит ряд определений критических констант, вошедших в мировые справочники. О. Э. Страус нашёл формулу для критической температуры смеси:

$$\vartheta = \frac{\alpha_1 \vartheta_1 + \alpha_2 \vartheta_2}{\alpha_1 + \alpha_2},$$

α_1 и α_2 — процентное содержание компонент смеси в растворе, ϑ_1 и ϑ_2 — их критические температуры.

В 80-х годах Авенариуса захлёстывает «электрическая горячка», он изобретает систему электрического освещения свечами Яблочкова, за которую получает в 1881 г. на международной электрической выставке серебряную медаль; однако ожидаемых средств изобретатель не получил. А он рассчитывал на эти средства провести в широком масштабе опыты по управлению аэростатов. Следовательно, Авенариус не остался безучастным и к «воздушной горячке».

Имеются сведения, что в 1881 г. Авенариус намеревался поставить опыты по получению «электрических лучей». К сожалению, никаких подробностей об этих опытах не сохранилось.

Умер Авенариус 4 сентября (ст. ст.) 1895 г. Автор его некролога А. Г. Столетов пережил его несколькими месяцами.

В 1900 г. физика в Киевском университете была представлена Николаем Николаевичем Шиллером, Георгием Георгиевичем де Метцем и Иосифом Иосифовичем Косоноговым.

Николай Николаевич Шиллер родился 1 марта 1848 г. в семье коллежского асессора. В 1864 г. окончил I Московскую гимназию и поступил в Московский университет. Университет окончил в 1868 г. кандидатом и оставлен для приготовления к профессорскому званию. В 1870 г. сдал кандидатский экзамен и получил должность сверхштатного лаборанта в лаборатории А. Г. Столетова. В 1871 г. был командирован в Берлин, где работал в лаборатории Гельмгольца. В 1875 г. защитил в Московском университете магистерскую диссертацию «Опытное исследование электрических колебаний». В том же году приглашен в Киев читать курс теоретической физики в должности приват-доцента.

В 1876 г. защитил опять-таки в Московском университете докторскую диссертацию «Диэлектрические свойства концов разомкнутых токов в диэлектрике», после чего был утверждён в звании экстраординарного профессора. В 1884 г. после утверждения в Киеве кафедры теоретической физики Шиллер становится ординарным профессором по этой кафедре.

В 1903 г. получил назначение на должность директора Харьковского технологического института, в 1905 г. он — член совета министерства просвещения. Умер 10 ноября 1910 г.

Научная деятельность Шиллера обширна и разнообразна. В четвёртой главе мы говорили о его фундаментальном вкладе в развитие теории Максвелла. Кроме того, большое значение имеют его работы по термодинамике, логическому анализу понятий которого он уделял много внимания. В частности ему принадлежит та формулировка второго начала, согласно которой дифференциальное выражение первого начала термодинамики имеет интегрирующий множитель, являющийся функцией температуры. В дальнейшем эта формулировка получила название принципа Каратеодори. В изданном им в 1884 г. курсе «Основания физики», часть первая: кинематика, принципы динамики, статика и кинематика твёрдого тела, он ясно и правильно излагает запутанный вопрос о центробежных силах. Однако в ряде случаев Шиллер отступает от прогрессивных взглядов русского материалистического естествознания, а в своих политических взглядах был убеждённым реакционером, что в конце концов и привело его в сферу чиновников министерства просвещения. Шиллер метил и в академии, справедливо полагая, что его убеждения соответствуют духу этого правительственного учреждения. Однако президент предпочёл Голицына.

Г. Г. де Метц подробно занимался вопросом двойного преломления в жидкостях, возникающего при деформациях в них. Максвелл в 1874 г. предложил два метода для наблюдений двойного преломления в жидкостях при деформациях. Один метод, посредством которого он обнаружил двойное преломление в бальзаме, состоял в сдавливании и растяжении жидкости. Максвелл производил это в канадском бальзаме простым движением лопаточки. Второй метод заключался в помещении испытуемой жидкости между двумя концентрическими цилиндрами, из которых один приводился во вращение. Максвелл пытался этим способом обнаружить явление в растворе гуммиарабика и растворе сахара, но успеха не имел.

В 1888 г. де Метц исследовал этим способом оливковое, миндальное, касторовое масло, рыбий жир и пр. Он нашёл, что разность хода лучей обыкновенного и необыкновенного примерно пропорциональна скорости вращения цилиндра и растёт с изменением температуры пропорционально коэффициенту вязкости. В 1902 г. он усовершенствовал первый метод Максвелла. Жидкость помещается между скрещёнными николями, главные сечения которых образуют угол 45° между собой. Внутри жидкости помещаются две вертикальные параллельные пластинки, которые можно сдвигать и раздвигать. Де Метц нашёл двойное преломление в 16 жидкостях. В то же время де Метц наблюдал эффект Керра в чистой воде и водных растворах коллодия и желатина.

И. И. Косоногов получил большую известность как методист и автор концентрического учебника по физике для средней школы. Старейший университет Украины — Харьковский — в 1900 г. не имел профессора физики. На кафедре физики работал приват-доцент А. К. Погорелко. В это время в Харькове была сильно представлена механика Александром Михайловичем Ляпуновым (1857—1918) и его выдающимся учеником Владимиром Андреевичем Стекловым.

Русские
механики.

Русская механика в XIX в. вышла на одно из первых мест в мире. В её активе были замечательные исследования Михаила Васильевича Остроградского (1801—1862), развившего после Лагранжа принцип возможных перемещений, сформулировавшего независимо от Гамильтона принцип экстремального действия, получившего важное в аналитической механике дифференциальное уравнение, называемое уравнением Якоби, которое Остроградский обобщил на случай несвободного движения, в связи с чем оно носит название уравнения Остроградского-Якоби, и ряд других существенных результатов.

Глубокий вклад в теорию плоских механизмов сделал знаменитый математик Пафнутий Львович Чебышев (1821—1894), который не только дал их математическую теорию, но и сконструировал ряд оригинальных систем.

Имеющая важное значение для современной техники теория автоматического регулирования была начата разработкой в 1877—1878 гг. Иваном Алексеевичем Вышнеградским (1831—1895).

Больших успехов в решении сложной задачи о вращении твёрдого тела, имеющего неподвижную точку, добилась Софья Васильевна Ковалевская (1850—1894).

Н. Е. Жуковский дал механическую иллюстрацию различных случаев задачи о вращении твёрдого тела вокруг неподвижной точки тремя волчками. Если центр тяжести волчка совпадает с точкой опоры, то мы имеем случай Эйлера-Пуансо; если центр тяжести лежит выше точки опоры — случай Лагранжа-Пуансо, и если центр тяжести ниже точки опоры — случай Ковалевской. В этом последнем случае с поворотом волчка изменится и момент силы тяжести относительно точки опоры. Ковалевская с поразительным искусством сумела разработать математический метод решения этой сложнейшей задачи и найти общий интеграл дифференциальных уравнений движения (1888).

Николай Егорович Жуковский защитил в 1876 г. магистерскую диссертацию «Кинематика жидкого тела», в 1888 г. докторскую диссертацию «О прочности движения», написал ряд первоклассных работ по гидродинамике, дал теорию гидравлического удара в трубах и теорию мёртвой петли в работе «О парении птиц».

В ряду первоклассных русских работ по механике выделяются исследования А. М. Ляпунова. Его математическая диссертация «Об устойчивости эллипсоидальных форм равновесия вращающейся жидкости» (1884) была посвящена решению трудной и важной проблемы о фигурах равновесия вращающейся жидкости. Этой же проблемой после Ляпунова занимался А. Пуанкаре, который, опубликовав только часть полученных Ляпуновым результатов, без строгих доказательств получил звание академика и мировую известность.

В работах 1888—1892 гг. Ляпунов занимался вопросом об устойчивости движения. Эта задача была предметом его докторской диссертации. Ляпунов разработал критерий устойчивости движения и математическую теорию проблемы. Теория Ляпунова послужила исходным пунктом для разработки важных проблем современной радиотехники, теории регулирования и т. д.

Физики Одессы. Одесский (Новороссийский) университет был преобразован из Ришельевского лицея в 1865 г. В 1900 г. кафедре физики в нём занимал Фёдор Никифорович Шведов (1832—1905). Ученик Ленца, Шведов в 60-х годах принимал участие в революционном движении, был арестован, содержался в Петропавловской крепости. По выходе из заключения Шведов не принимал более прямого участия в революционной борьбе, и формой служения народу избрал науку. В 1867 г. он защитил магистерскую диссертацию «О значении непроводников в электричестве», в 1868 г. был утверждён магистром, в конце этого года он утверждается доцентом Новороссийского университета, в котором проработал тридцать пять лет, занимая последовательно должности экстраординарного, затем ординарного профессора, декана физико-математического факультета и ректора. При нём было выстроено новое здание медицинского факультета и физического института.

Докторская диссертация Шведова (1870) была посвящена вопросу превращения электричества в теплоту, в ней Шведов изучал тепловое действие электрического разряда. Он показал, что при данной плотности заряда обкладок конденсатора, их площади и диэлектрической постоянной количество тепла пропорционально толщине промежуточного слоя, а при данных плотности, площади и толщине обратно пропорционально диэлектрической постоянной. Дальнейшие работы Шведова относятся к области космической физики и физики атмосферы. Интересны его работы об электрических лучах, в которых он развивает электрооптическую аналогию.

Александр Викентьевич Колосовский (1846—1917) окончил Киевский университет в 1868 г. Был оставлен при университете. Читал курс метеорологии. В 1886 г. приглашается в Новороссийский университет и здесь развёртывает большую работу по организации юго-западной метеорологической сети. В 1892 г. он организует в Одессе магнито-метеорологическую обсерваторию. Им основан журнал «Метеорологическое обозрение», написан классический учебник по метеорологии.

После ухода Умова теоретическую физику в Одессе читал Николай Дмитриевич Пильчиков (1857—1908). Обследуя в 1883 г. Курскую магнитную аномалию (открытую в 1874 г. И. Н. Смирновым), он обнаружил новые пункты аномалии в Марьине и Прохоровке. Он указал, что причиной аномалии являются залежи железной руды. Результаты его исследования обобщены им в магистерской диссертации «Материалы к вопросу о местных аномалиях земного магнетизма» (1888). Далее Пильчиков занимался экспериментально и теоретически проблемой электролиза. Одним из первых в России он стал применять термодинамический метод Гиббса к изучению

этого явления («Материалы к вопросу о приложении термодинамического потенциала к изучению электрохимической механики», 1896). Пильчиков был также одним из пионеров русской рентгено- и радиологии. В 1896 г. он ввёл в рентгеновскую трубку антикатод в виде слюдяной пластинки, покрытой сернистым цинком, и независимо от Рентгена показал, что электрическое и магнитное поля не действуют на рентгеновские лучи. По его гипотезе X-лучи представляют поперечные колебания эфира со столь короткой длиной волны, что обычные зеркальные поверхности рассеивают их. После приобретения в 1900 г. препаратов радия на Парижском конгрессе он начал эксперименты с радием, описанные им в статье «Радий и его лучи» (1901).



Д. А. Гольдгаммер

Приват-доцентами по физике в Одессе в 1900 г. работали: М. С. Панченко, Б. П. Вейнберг, Л. Г. Данилов.

Физики Казани
и Юрьева.

В Казанском университете на кафедре физики работали Дмитрий Александрович Гольдгаммер (1860—1922), Всеволод Александрович Ульянов и Николай Петрович Слугинов (1854—1897).

Ученик Столетова, Д. А. Гольдгаммер был оставлен в 1882 г. для подготовки к профессорскому званию. После двухлетней работы в лаборатории Столетова к сдаче магистерского экзамена Гольдгаммер уезжает за границу, где работает в Страсбурге у Кундта. Защищённая им в 1888 г. магистерская диссертация посвящена исследованию влияния магнитного поля на физические свойства металлов, в особенности на электропроводность. Докторская диссертация Гольдгаммера посвящена электромагнитной теории света (1891). Вопросам электромагнитной теории света и светового давления Гольдгаммер уделял много внимания.

Всеволод Александрович Ульянов — пионер в конструировании фотоэлемента с запирающим слоем и в исследовании полупроводников (1888), известен также исследованием «Закон Ламберта и поляризация Араго» (1899), в котором он установил связь закона Ламберта с законом Кирхгофа, показал, что закон Ламберта применим только для рассеивающей поверхности, а также рассмотрел вопрос о поляризации света при излучении, поставленный Араго.

В Юрьевском университете в 1900 г. работали известный метеоролог Борис Измайлович Срезневский, Густав Тамман — профессор химии, изучавший физико-химические свойства сплавов и фазовые равновесия в сплавах, Александр Иванович Садовский, автор так называемого «эффекта Садовского», о котором шла речь в четвёртой главе, и приват-доцент М. П. Зака.

Следует отметить обстоятельные и глубокие исследования по статистической физике, проведенные в 1883—1900 гг. сыном знаменитого русского врача Н. И. Пирогова Николаем Николаевичем Пироговым (1843—1891), о работах которого высоко отзывался Л. Больцман.



Н. П. Слугинов

Н. Н. Пирогов, рассматривая вопрос о распределении скоростей молекул газа, пришёл к выводу, что максвелловское распределение получается только в случае газа, занимающего безграничный объём, когда скорости молекулы можно считать изменяющимися в пределах от нуля до бесконечности. В случае сосуда с конечными стенками пределы скорости будут конечными, и это приводит к новому распределению, отличному от максвелловского. Очень существенен результат, полученный Пироговым в 1889 г. Рассматривая задачу о распределении молекул свободного газа по объёму, он приходит к следующему выводу о возможных отступлениях (флуктуациях) этого распределения от среднего:

«Если дана система, состоящая из весьма большого числа N частиц (материальных точек), свободно движущихся в пространстве, разделённом на n однородных и равных между собой «клеточек», то $P_0, P_1, P_2, P_3, \dots$

вероятности того, чтобы в любой из этих клеточек одновременно находились 0, 1, 2, 3 ... частиц системы, определяются выражениями:

$$P_0 = e^{-\epsilon}; \quad P_1 = \epsilon e^{-\epsilon}; \quad P_2 = \frac{\epsilon^2}{1 \cdot 2} e^{-\epsilon}; \quad P_3 = \frac{\epsilon^3}{1 \cdot 2 \cdot 3} e^{-\epsilon} \text{ и т. д.,}$$

где:

$$\epsilon = \frac{N}{n}.$$

Этот результат был получен М. Смолуховским в 1904 г., т. е. через 15 лет после Пирогова. Поэтому справедливо будет называть задачу о флуктуациях плотности свободного газа задачей Пирогова-Смолуховского, а формулу

$$P_n = \frac{\nu^n}{n!} e^{-\nu}, \quad \text{где } \nu = \frac{N}{n},$$

формулой Пирогова-Смолуховского.

В заключение укажем, что в Варшавском университете профессором физики был Пётр Алексеевич Зильов, ученик Столетова, о работах которого по исследованию диэлектрических и магнитных свойств вещества речь шла в четвёртой главе. В Варшаве он основал журнал «Физическое обозрение», который потом издавался в Киеве де Метцем. Профессором математической физики был другой ученик Столетова Борис Вячеславович Станкевич, автор первого на русском языке курса «Кинетическая теория газов», вышедшего в 1885 г.

Выводы.

Какие же выводы можно сделать из обзора успехов русской физики конца XIX в.? Первый вывод — что эти успехи неоспоримы и значительны. Периодический закон Менделеева, радио Попова, световое давление Лебедева, кристаллографические системы Фёдорова, учение о движении энергии Умова, законы фотоэффекта Столетова и многое другое составляют существенный вклад России в мировую науку. Если к этому добавить успехи русской математики, механики

и техники, включая электротехнику, открытия в биологии, химии, медицине, геологии, географии и т. д., то мы получим внушительную картину мощного потока русской научной мысли.

Этот вывод бесспорно правилен. Но вместе с тем нельзя забывать о тех ужасающих условиях, в которых происходило развитие русской науки. Вместе со всем русским народом учёные России испытали на себе всю тяжесть гнёта самодержавия, все последствия экономической, политической и культурной отсталости России. «Так жить нельзя», — говорили вместе со всем народом деятели русской науки и культуры в 60-х годах. «Так жить нельзя», — повторяли они в эпоху реакции 80—90-х годов. Мы приводили выше документы, подтверждающие этот вывод. Дополним же их несколькими, относящимися уже к XX в.

«Отдыхайте, отдыхайте сколько возможно и подолее не возвращайтесь в этот несчастный сумасшедший дом, именуемый Российским университетом! — писал в 1902 г. К. А. Тимирязев П. Н. Лебедеву. — О том, что здесь творилось и творится, не буду говорить, чтобы не нарушать главного достоинства Вашего отдыха, т. е. блаженного неведения. Скажу только: не верьте тем гадостям, которые распространяют про бедных студентов».

А вот отрывок из письма Лебедева, относящегося ко времени его ухода из университета в 1911 г.

«... Я знаю ощущение близости смерти, и пережил его секунду за секундой, в абсолютно ясном сознании во время одного сердечного приступа (врач тоже не думал, что я переживу) — знаю это жуткое чувство, знаю, что значит готовиться к этому шагу, знаю, что этим не шутят, — и вот, если сейчас, как тогда, вот тут, когда я Вам пишу, ко мне опять подошла бы смерть, я теперь не препятствовал бы, а сам пошёл ей навстречу — так ясно мне, что жизнь кончена». А ведь Лебедев писал в этом же письме, что его «голова набита научными планами», что он ещё не сказал «своего последнего слова» в науке. В чём же дело?

«Убивает не один только нож гильотины, — отвечал через год после этого письма К. А. Тимирязев в строках, посвящённых памяти Лебедева. — Лебедева убил погром Московского университета».

Вспоминая о многих и многих жертвах русской культуры и науки, убитых самодержавным строем, К. А. Тимирязев возлагал надежды на то будущее, когда «людям «с умом и сердцем» откроется, наконец, возможность жить в России, а не только родиться в ней, — чтобы с разбитым сердцем умереть».

Это и есть второй и главный вывод из истории русской науки конца XIX — начала XX в.: она не могла более развиваться в этих невыносимых условиях. Русской науке нужна была революция. И она пришла.

Подведём кратко основные итоги напряжённой работы физиков за тридцатилетие 1871—1900 гг.

В области экспериментальной физики были достигнуты такие результаты, как сжижение всех газов кроме гелия, получение быстрых электрических колебаний, получение электромагнитных волн и открытие радио. Серьёзных успехов добилась экспериментальная оптика, были изготовлены решётки и интерференционные спектральные аппараты высокой разрешающей силы, были изготовлены интерферометры и проведены классические сравнения метра с длиной волны, поставлены опыты по обнаружению «эфирного ветра». Усовершенствовалась измерительная техника, в особенности техника электрических измерений.

Однако в этой области ещё не была осуществлена та революция, которая была произведена в дальнейшем электронной лампой. Но предпосылки к этой революции были уже созданы открытием электрона, исследованием фотоэффекта и термоэлектронной эмиссии. Исследования электрических разрядов в газах существенно подвинулось вперёд и привели к открытию рентгеновских лучей и радиоактивности.

В области теоретической физики испытала крупнейшие преобразования. По существу в этот период возникла теоретическая физика, сменившая математическую, слабо связанную с экспериментом и бывшую не чем иным, как главой математического анализа. Теоретическая физика развивалась по двум направлениям: 1) физика континуума — термодинамика, оптика, теория упругости и теория электромагнитного поля, 2) атомистика.

Возникновение теории электромагнитного поля было главной частью работы теоретиков в исследуемый период.

Наряду с физикой континуума успешно развивалась физика дискретных систем — атомистика. Успехи кинетической теории газов и статистической механики составляют один из замечательных итогов истекшего тридцатилетия.

Объединение оптики и термодинамики, с одной стороны, оптики и электродинамики, с другой, привели к разработке синтетических теорий континуума и атомистики: электронной теории и теории излучения. В рамках этой теории обнаружилась недостаточность классических представлений, была сформулирована гипотеза квант и вскрыты противоречия в теории электродинамики движущихся сред.

Прогресс, достигнутый физикой к концу XX в имел огромные научно-технические, философские и общественные последствия. Радиотехника и электроника с их глубоким проникновением в технику и жизнь современного общества развились на базе открытий, сделанных в конце XIX в. Из этих открытий выросли и развились радиофизика, физика металлов, магнетизм, квантовая механика, теория относительности, стати-

стическая физика и другие разделы современной физики. Из этих открытий выросла и развилась атомная, ядерная физика, породившая в наши дни новую область техники: ядерную технику, которая открыла новую эру технического прогресса.

Открытия физики конца XIX в. оказали огромное влияние на развитие мировоззрения XX в., на философию нашего времени. Во второй половине XIX в. отношение естествознания к философии резко меняется.

Эмпирия, пытавшаяся освободиться от философии, вынуждена была самым фактом открытия закона сохранения энергии вновь вернуться к теоретико-познавательным вопросам и к задаче создания единой картины мира. Эта задача поставлена в порядок дня, и в физике идут многочисленные дискуссии о характере этой картины. Открытие электромагнитной массы, внутриатомных превращений ломает устои механического мировоззрения, ведёт к его кризису. Вызревание философского кризиса в физике — один из важнейших итогов развития физической науки за рассматриваемое тридцатилетие.

В этом итоге находит своё частичное выражение и другое важнейшее следствие прогресса физики — усиление её роли в развитии общества.

Дискуссии в физике становятся достоянием широких кругов, волнуют самые различные слои общества. В особенности большой интерес проявляет к ним передовая партия рабочего класса. Коммунистическая партия, поставившая в порядок дня задачу революционного преобразования общества, ликвидацию эксплуатации человека человеком, не может быть безучастной к науке.

В своей практической работе Коммунистическая партия руководится передовой теорией, основанной на последних данных науки о природе и обществе. Поэтому основатели Коммунистической партии Маркс и Энгельс проявляли большой интерес к науке и широко использовали её достижения для создания и развития передовой науки — марксизма.

Энгельс обобщил данные современного ему естествознания в «Анти-Дюринге», вышедшем в 1878 г., второе издание которого вышло в 1885 г., а третье в 1894 г. В те же 70—80-е годы Энгельс усиленно работал над большим трудом, посвящённым философии естествознания, который в несконченном виде под заглавием «Диалектика природы» вышел уже спустя долгие годы после смерти Энгельса — в 1925 г. В этих трудах мы находим гениальное философское обобщение развития естествознания, в том числе физики — химии к концу XIX в.

Новые события в истории физической науки привлекли внимание Ленина. В 1909 г. появился гениальный труд В. И. Ленина «Материализм и эмпириокритицизм», в котором дана глубокая оценка «новейшей революции в естествознании», вскрыты причины кризиса физики и указаны пути его преодоления. Книга эта составила целую эпоху в развитии науки.

Кризис физики был обусловлен не только внутренними факторами. Он усугублялся внешними причинами, положением науки в классовом обществе. Мы уже неоднократно указывали, что дальнейшее развитие производства невозможно без научной основы. Капитализм вынужден использовать новую науку и технику. Но он использует её не заботясь о всестороннем развитии науки и тем более о развитии научного мировоззрения, играющего столь важную роль в науке.

Основной экономический закон капитализма в эпоху монополистического капитализма — это закон максимальной прибыли, которому подчинено всё, в том числе и наука. И это-то и является главнейшим источником кризисов в науке

Физика имеет важное значение для крупного производства, в том числе и для военного производства. Развивая бешеную подготовку к грабительским империалистическим войнам, капитализм вербует физиков, покупает их, втягивает в свой капиталистический «бизнес».

Так, известный американский изобретатель Т. А. Эдисон становится одним из главарей фирмы, вошедшей впоследствии в крупнейшую монополию «Дженерал электрик». Немецкий физик Рапс являлся директором фирмы Сименс и Гальске.

Капитализм использует все средства нажима и подкупа, чтобы свернуть науку с пути прогресса, с пути служения человечеству на путь служения капиталу и войне. В этом источник величайшей опасности для науки. Ленин указывал, что *«только социализм освободит науку от ее буржуазных пут, от ее порабощения капиталу, от ее рабства перед интересами грязного капиталистического корыстолюбия»*¹.

¹ В. И. Ленин. Соч., т. 27, стр. 375.

КРАТКИЙ БИОГРАФИЧЕСКИЙ СПРАВОЧНИК

Аббе Эрнст (Abbe Ernst) (1840—1903) — немецкий физик, профессор в Иене, основатель совместно с К. Цейссом известного немецкого оптического завода Цейсса. Разработал теорию микроскопа и его разрешающей силы (1874). Вместе с Отто Шоттом организовал в Иене завод оптического стекла.

Абрагам Макс (Abraham Max) (1875—1922) — немецкий физик-теоретик, автор (совместно с Фепплем) известного двухтомного труда по теории электромагнитного поля, впоследствии переработанного Беккером. Разрабатывал вопросы динамики электрона, был одним из инициаторов введения в теорию электричества понятия электромагнитного количества движения, вывел формулу зависимости массы электрона от скорости в предположении, что электрон является жёстким заряжённым шариком.

Авенариус Михаил Петрович (1835—1895) — русский физик, профессор Киевского университета, создатель и руководитель киевской школы физиков, известный исследованиями критического состояния. Помимо работ по критическому состоянию, известен своими исследованиями по термоэлектричеству; им найдена эмпирическая формула зависимости термоэлектродвижущей силы от разности температур спаев.

Алексеев Владимир Фёдорович (1852—1919) — русский физико-химик, профессор петербургского Горного института. Занимался исследованием растворов, считая их продуктами физического взаимодействия их составных частей, разработал метод исследования растворимости жидкостей, ввёл понятие критической температуры смешанных жидкостей.

Амага Эмиль (A mag a ' Emile Hilaire) (1841—1915) — французский физик, занимался исследованием сжимаемости жидкостей и газов при больших давлениях, установил отклонение сжимаемости газов от закона Бойля-Мариотта.

Ангстрем Андерс Йонас (O ng s t r ö m Anders Jonas) (1814—1874) — шведский физик, составил первый большой атлас спектральных линий нормального солнечного спектра, измерив с большой точностью длины волн. Его именем названа единица длины.

Аррениус Сванте Август (A rr h e n i u s Svante) (1859—1927) — шведский физик и химик, один из основоположников физической химии, в 1887 г. предложил гипотезу электролитической диссоциации. Занимался астрофизическими проблемами, исследованием токсинов и антитоксинов, лауреат Нобелевской премии по химии 1903 г.

Бальмер Иоганн Яков (B al m e r Johann Jakob) (1825—1898) — швейцарский физик, учитель. В 1885 г. предложил эмпирическую формулу для вычисления частот спектральных линий видимой серии линейчатого спектра водорода.

Беккерель Эдмунд (B e s q u e r e l Alex. Edmond) (1820—1891) — французский физик, сын Антуана Цезаря Беккереля (1788—1878), занимался ис-

следованием фосфоресценции, изобретатель фосфороскопа (1859). Его исследования по фосфоресценции собраны в двухтомном трактате «Свет — его причины и действия», вышедшем в Париже в 1867—1868 гг.

Беккерель Антуан Генри (Becquerel Antoine Henri) (1852—1908) — французский физик, сын Э. Беккереля, в 1896 г. открыл радиоактивность. В 1903 г. вместе с П. и М. Кюри получил Нобелевскую премию по физике за открытие радиоактивности.

Белл Александр Грэхем (Bell Alexandre Graham) (1847—1922) — американский изобретатель. В 1876 г. изобрёл телефон.

Белопольский Аристарх Аполлонович (1854—1934) — русский астрофизик. Впервые доказал применимость принципа Доплера к световым явлениям. Исследовал двойные звёзды, вращение Солнца и др.

Бенуа Рене (Benoit Rene) (1844—1922) — французский физик. Известен обширными метрологическими исследованиями.

Бецольд Вильгельм (Betzold Wilhelm) (1837—1907) — немецкий физик, впервые в 1870 г. наблюдал электрические колебания в проволоках со свободным концом и в проволочных контурах с искровым промежутком. Отрывок из исследования Бецольда поместил Герц в приложении к своей статье «О весьма быстрых электрических колебаниях».

Биркеланд Кристиан (Birkeland Kristian) (1867—1917) — норвежский физик, известен исследованиями по земному электричеству и магнетизму.

Блазерна Пьетро (Blaserna Pietro) (1836—1918) — итальянский физик. В 1858 г. впервые снял резонансную кривую электрических колебаний (в работе «Об индуцированном токе побочной батареи»), дал ряд работ по кинетической теории газов.

Больцман Людвиг (Boltzmann Ludwig) (1844—1906) — австрийский физик, профессор в Граце и Вене, один из основоположников статистической физики. С позиций материалистической атомистики боролся с энергетиками. Установил связь энтропии с вероятностью состояния (1877). В 1884 г. обосновал теоретически закон пропорциональности энергии чёрного излучения четвёртой степени абсолютной температуры, установленный эмпирически Стефаном в 1879 г. В 1875 г. измерял диэлектрические постоянные газов и паров с помощью разработанного им метода и установил для ряда газов справедливость закона $\epsilon = n^2$. Его классические «Лекции по теории газов» вышли в 1896—1898 гг. Больцман покончил самоубийством в 1906 г.

Бойс Чарльз Вернон (Boys Charles Vernon) (1855—1932) — английский физик-экспериментатор, изобретатель ряда физических приборов и демонстраций.

Боргман Иван Иванович (1849—1914) — русский физик, профессор Петербургского университета, автор первого руководства по максвелловской теории на русском языке «Основания учения об электрических и магнитных явлениях», вышедшего в двух томах в 1893—1895 гг. Им написано большое количество работ по электричеству экспериментального характера, в частности по превращению световой энергии в электрическую. Редактировал неперiodическое издание «Новые идеи в физике».

Бранли Эдуард (Branly Edouard) (1859—1927) — французский физик, известен изобретением когерера и работами по проводимости твёрдых тел и газов.

Браун Карл Фердинанд (Braun Carl Ferdinand) (1850—1918) — немецкий физик, профессор Страсбургского университета. Занимался вопросами электрических колебаний (в частности исследованием связанных систем) и радиотелефоном. В 1909 г. вместе с Маркони получил Нобелевскую премию по физике за развитие беспроволочного телефона. Был учителем видного советского физика — акад. Л. И. Мандельштама.

Бредихин Фёдор Александрович (1831—1904) — русский астроном, профессор Московского университета, затем академик, директор Пулковской обсерва-

тории (1890—1895). Изучал теорию комет, создал теорию кометных форм, поставил вопрос о природе отталкивательных сил, действующих со стороны Солнца на частицы вещества. Этот вопрос был выяснен П. Н. Лебедевым, указавшим на роль светового давления.

Бенардос Николай Николаевич (1842—1905) — русский изобретатель-электрик. В 1882 г. изобрёл способ электросварки электрической дугой. В способе Бенардоса дуга образовалась между угольным электродом и свариваемыми предметами.

Бьеркнес Карл Антон (Bjerknes Carl Anton) (1825—1903) — норвежский физик и математик. Разрабатывал гидродинамические модели механического и электрического взаимодействия. Теоретически и экспериментально исследовал в 1868—1874 гг. взаимодействие двух пульсирующих шаров. Опыт с взаимодействиями двух пульсирующих барабанов демонстрировал в 1886 г. на Парижской электрической выставке.

Бьеркнес Вильгельм (Bjerknes Wilhelm) (1862—1939) — профессор механики и математической физики в Осло и Фигольме. Разрабатывал вопросы гидродинамики и динамической метеорологии, доказал теорему Бьеркнеса об усилении циркуляции. В 1891 г. изучил явление электрического резонанса в работе «О затухании быстрых электрических колебаний».

Бунзен Роберт Вильгельм (Bunsen Robert Wilhelm) (1811—1899) — немецкий химик. В 1859 г. вместе с Кирхгофом положил начало спектральному анализу, при помощи которого в 1860 г. открыл цезий, а в 1861 г. рубидий. Изучал диффузию газов через пористые стенки и абсорбцию газов. Изобрёл газовую горелку (1857), ледяной калориметр, водоструйный насос (1869).

Ван-дер-Ваальс Иоганнес Дидерик (Van Der Waals Johannes Diderik) (1837—1923) — голландский физик, лауреат Нобелевской премии.

Дал уравнение состояния газов и жидкостей, названное его именем (1873). Предложил общее уравнение для бинарной двухфазной смеси, развил термодинамическую теорию капиллярности.

Вант-Гофф Якоб Хендрик (Vant-Hoff Jakob Hendrick) (1852—1911) — голландский физико-химик, один из основателей современной физической химии и стереохимии.

В 1887 г. открыл закон осмотического давления, названный его именем. Дал одно из уравнений термодинамики — уравнение изохоры; вывел формулу, выражающую зависимость химического сродства от константы равновесия химической реакции при постоянной температуре. Дал теорию разбавленных растворов, введя аналогию между веществом в растворённом и газообразном состояниях. Ввёл понятие твёрдых растворов (1890).

Варбург Эмиль Габриэль (Warburg Emil Gabriel) (1846—1931) — немецкий физик, известен экспериментальными исследованиями свечения разреженных газов и фотолиза. Автор широко известного курса опытной физики.

Вин Вильгельм Карл (Wien Wilhelm Karl) (1864—1928) — немецкий физик, лауреат премии Нобеля, один из авторов многотомного «Руководства по экспериментальной физике». Открыл один из законов теплового излучения, разработал метод измерения длительности свечения свободных атомов, изучал отклонение частиц в электрическом и магнитном полях.

Винер Отто Генрих (Wiener Otto Heinrich) (1862—1927) — немецкий физик, автор ряда работ по методологическим вопросам физики и исторических очерков; дал метод получения стоячих световых волн.

Вихерт Иоганн Эмиль (Wiechert Johann Emil) (1861—1928) — немецкий геофизик, известен сейсмометрическими исследованиями, автор теории электродинамического происхождения тяготения.

Вебер Вильгельм Эдуард (Weber Wilhelm Eduard) (1804—1891) — немецкий физик. Автор известного электродинамического закона. Один из основоположников электрометрии. Вместе с Кольраушем впервые измерил отношение электромагнитных и электростатических единиц.

Вебстер Артур Гордон (Webster Artur Gordon) (1863—1923) — американский физик, известен исследованиями по математической физике.

Венельт Артур Рудольф (Wehnelt Arthur Rudolf) (1871—1949) — немецкий физик. Известен многочисленными экспериментальными исследованиями главным образом в области физики электронов, газового разряда и рентгеновского излучения; автор фундаментального «Физического практикума». Именем Венельта называется изобретённый им электролитический прерыватель.

Видеман Эйлард Эрнст (Wiedemann Eilard Ernst) (1852—1928) — немецкий физик, редактор известного журнала «Анналы физики» (после Поггендорфа), историк физики, автор фундаментального «Физического практикума» (совместно с Эбертом).

Вильсон Чарльз Томсон Рис (Wilson Charles Thomson Rise) (р. 1869) — английский физик, изобретатель широко известного в физике прибора — камеры Вильсона.

Вроблевский Сигизмунд Антонович (Сигмунд Флоренти) (Wroblewski Zigmunt Florenty) (1845—1888) — польский физик, профессор Краковского университета, автор важных экспериментальных работ по сжижению газов и технике низких температур. Трагически погиб при взрыве экспериментальной установки.

Вульф Георгий Викторович (1863—1925) — русский кристаллограф. Открыл закон, согласно которому скорости роста граней кристалла пропорциональны удельным поверхностным энергиям этих граней. Независимо от У. Г. Брэгга вывел формулу, лежащую в основе рентгеноструктурного анализа (условие Брэгга-Вульфа). Разработал простой графический метод обработки результатов измерения кристаллов, дал способ вывода всех видов симметрии кристаллов.

Гальвакс Вильгельм (Hallwachs Wilhelm) (1859—1922) — немецкий физик, один из первых исследователей фотоэлектрических явлений. Он впервые показал, что под действием ультрафиолетового света металлы теряют отрицательный заряд.

Гезехус Николай Александрович (1845—1912) — русский физик, профессор и проректор Петербургского технологического института, первый ректор Томского университета, редактор физической части «Журнала Русского физико-химического общества». Ему принадлежит ряд интересных экспериментальных исследований в области молекулярной физики, электромагнетизма и акустики.

Гейслер Генрих (Geissler Heinrich) (1815—1879) — немецкий физик, конструктор ряда физических приборов: ареометров, ртутных насосов, так называемых гейслеровых трубок.

Генри Джозеф (Henry Joseph) (1797—1878) — американский физик, внёс важный вклад в развитие электромагнетизма. Исследовал явление самоиндукции. Дал теорию разряда лейденской банки, внёс усовершенствования в технику телеграфирования. Его именем названа единица самоиндукции.

Георгиевский Николай Николаевич (1872—1928) — русский физик, метролог Главной палаты мер и весов, автор ряда оригинальных метрологических исследований.

Гельмгольц Герман Людвиг Фердинанд (Helmholz German Ludwig Ferdinand) (1821—1894) — немецкий физик и физиолог. Сыграл ведущую роль в обосновании закона сохранения и превращения энергии, впервые указал на всеобщность этого закона природы. Доказал применимость принципа наименьшего действия к тепловым, электромагнитным и оптическим явлениям, вскрыл связь этого принципа

со вторым началом термодинамики. Он впервые в ясной форме высказал идею атомизма электричества. Гельмгольц развил теорию вихревого движения и дал ряд блестящих примеров практического приложения этой теории к исследованию механических и электромагнитных процессов. Им развита электромагнитная теория света и теория аномальной дисперсии. По предложению Гельмгольца Герц произвёл свои знаменитые опыты с электромагнитными волнами. Плодотворные результаты принадлежат Гельмгольцу в области акустики. Он разработал физическую теорию фонации, теорию взаимодействия звуковых волн с органами слуха, открыл комбинационные тоны.

Широко известны многочисленные оригинальные измерительные приборы, изобретённые Гельмгольцем: глазное зеркало, маятник Гельмгольца, резонаторы и др.

Большое место в работах Гельмгольца занимали вопросы мировоззренческого характера. Он последовательно проводил в своих исследованиях точку зрения механицизма. Гельмгольц — автор теории иероглифов, подвергнутой резкой критике В. И. Лениным в «Материализме и эмпириокритицизме».

Герц Генрих Рудольф (Hertz Heinrich Rudolf) (1857—1894) — немецкий физик. Впервые получил свободные электромагнитные волны и исследовал их свойства, доказав тождественность электромагнитных волн и световых лучей. Опыты Герца послужили решающим доказательством плодотворности максвелловской теории электромагнитного поля и явились началом бурного развития её практических приложений.

Герц дал теорию открытого вибратора, указал способ измерения скорости волн в проводнике. Он обнаружил влияние света на электрический разряд, дав этим толчок к открытию и исследованию фотоэлектрических явлений.

Теоретические исследования Герца касались вопросов электродинамики движущихся тел, рационализации уравнений Максвелла, построения механики, исключаящей понятие силы.

Гершун Александр Львович (1868—1915) — русский физик, создатель и руководитель оптической промышленности в дореволюционной России. Работал в области физической и геометрической оптики, электротехники и астрофизики. Ему принадлежит заслуга в восстановлении приоритета Н. П. Петрова в открытии электрической дуги.

Гефнер-Альтенек Фридрих (Hefner-Alteneck Friedrich) (1845—1904) — немецкий физик, известен изобретениями в области фотометрии.

Гиббс Джосия Уиллард (Gibbs Josye Willard) (1839—1903) — американский физик-теоретик, основоположник термодинамики фазовых превращений. Впервые развил плодотворный метод геометрического представления термодинамических процессов. Гиббс положил начало применению метода термодинамических потенциалов. Он создал статистическую механику, позволившую дать трактовку термодинамических потенциалов с точки зрения молекулярно-кинетических представлений. Построенная Гиббсом теория равновесия термодинамических систем привела к важному правилу фаз, названному его именем. Занимался также вопросами электромагнитной и механической теории света.

Гитторф Иоган Вильгельм (Hittorf Johan Wilhelm) (1824—1914) — немецкий физико-химик, исследовал проводимость электролитов и газов. Сыграл важную роль в открытии катодных лучей.

Голицын Борис Борисович (1862—1916) — русский физик. Впервые ввёл понятие температуры теплового излучения. Решил ряд важнейших задач сейсмологии: определение очага землетрясения по данным одной сейсмической станции, определение угла выхода сейсмической радиации, скорости сейсмических волн на различных глубинах Земли и др. Разработал теорию и конструкцию электродинамических сейсмографов. Голицыну принадлежит также ряд интересных работ в области физической оптики и критического состояния вещества.

Гольдгаммер Дмитрий Александрович (1860—1922) — русский физик, профессор Казанского университета. Известен исследованиями в области электромагнитной теории света и электронной теории. Он впервые вывел формулу для светового давления, постулированную Максвеллом.

Гольдштейн Эйген (Goldstein Eugen) (1850 — 1930) — немецкий физик, провёл серию исследований газового разряда, важнейшим результатом которых было открытие канальных лучей (1886). Работал в области спектрального анализа, важные результаты дали его исследования спектров испускания твёрдых органических соединений.

Гопкинсон Джон (Hopkinson John) (1849—1898) — английский физик, исследовал эффект Холла (1880), показатель преломления и диэлектрическую постоянную прозрачных диэлектриков (1882); занимался также проблемами электрического освещения и механики. Разработал метод «ярма» для магнитных измерений.

Депре Марсель (Derge Marsel) (1843—1918) — французский электротехник, теоретическими работами и экспериментами сыграл большую роль во внедрении в практику передачи электрической энергии на большие расстояния.

Де Кудр Теодор (Des Coudres Theodore) (1862—1926) — немецкий физик, развивая идеи Р. А. Колли, определил гравитационные э. д. с. ряда электролитов и доказал наличие инертности у ионов.

Де Метц Георгий Георгиевич (1831—1899) — русский физик, профессор Киевского университета. Занимался вопросом двойного преломления в жидкостях и изучением эффекта Керра в чистой воде и водных растворах коллодия и желатина.

Джинс Джеймс Хопвуд (Jeap se James Hopwood) (1877—1946) — английский физик и астрофизик, автор ряда космогонических и астрофизических теорий; ему принадлежат работы, посвящённые фигурам равновесия вращающихся жидких тел, кинетической теории газов и теории теплового излучения. Вместе с Релеем дал формулу распределения энергии в спектре чёрного тела, которая привела к так называемой «ультрафиолетовой катастрофе».

Дизель Рудольф (Disel Rudolf) (1858—1913) — немецкий инженер. Выдвинул идею создания экономичного двигателя внутреннего сгорания, работающего по циклу Карно, осуществление которой привело его к созданию широко известной конструкции двигателей, названных его именем.

Дьюар Джеймс (Dewar James) (1842—1923) — английский физико-химик. Известен обширными экспериментальными исследованиями свойств веществ при низких температурах, изобрёл сосуды для хранения сжиженных газов (1893).

Доливо-Добровольский Михаил Осипович (1861—1920) — русский электротехник, создатель техники трёхфазного тока. Дал способ деления напряжения постоянного тока по трёхпроводной системе распределения. Построил первый трёхфазный генератор переменного тока с вращающимся магнитным полем, двигатель и трансформатор к нему. Изобрёл целый ряд измерительных электрических приборов. Сыграл выдающуюся роль в развитии техники передачи энергии на большие расстояния.

Друде Пауль (Grude Paul) (1863—1906) — немецкий физик, дал ряд важных приложений классической электронной теории: построил теорию электронной проводимости металлов, теорию дисперсии света, поляризации света, отражённого от металлической поверхности. Ему принадлежат первые методы измерения диэлектрической проницаемости и поглощения жидких диэлектриков в поле дециметровых и метровых электромагнитных волн.

Егоров Николай Григорьевич (1849—1919) — русский физик, один из организаторов электротехнического раздела Русского технического общества, член Международного комитета мер и весов, организатор первой в России рентгеновской лабора-

тории. Егорову принадлежит ряд интересных экспериментальных исследований в области спектроскопии; он предложил один из способов наблюдения эффекта Зеемана.

Ж а м е н Жюль Селестин (J a m i n Jules Célestin) (1818—1886) — французский физик, исследователь критического состояния, диффузии и абсорбции газов. Он установил, что свет, отражённый от прозрачных тел, оказывается эллиптически поляризованным.

Ж е р а р Эрик Мари (G e r a r d Eric Marie) (1856—1916) — бельгийский физик, известен исследованиями в области электротехники.

Ж о л и Джон (J o l y John) (1857—1933) — английский геофизик, занимался исследованием радиоактивности пород, распределения радиоактивных элементов и вопросами оптики. Ему принадлежит широко известный метод определения гравитационной постоянной.

Ж у к о в с к и й Николай Егорович (1847—1921) — русский механик, «отец русской авиации», основоположник теории подъёмной силы самолётов, выдающийся педагог, воспитатель конструкторов самолётов. Многочисленные работы Жуковского относятся к аэродинамике, гидродинамике, гидравлике, механике неизменяемых систем, астрономии и математике.

З е е м а н Питер (Z e e m a n n Pieter) (1865—1943) — голландский физик. Открыл явление расщепления спектральных линий под действием внешнего магнитного поля (эффект Зеемана, 1896), сыгравшее важную роль в обосновании и развитии электронной теории. Дал один из методов измерения коэффициента поглощения электромагнитных волн. В 1902 г. вместе с Г. А. Лорентцом получил Нобелевскую премию «за исследования, касающиеся влияния магнетизма на явление радиации».

З е л ь м е й е р Вильгельм (S e l l m a y e r Wilhelm) (1836—1904) — немецкий физик-теоретик, автор электромагнитной теории дисперсии.

З и л о в Пётр Алексеевич (1849—1918) — русский физик. Известен пионерскими исследованиями по экспериментальному обоснованию выводов теории Максвелла. Основатель журнала «Физическое обозрение».

К а л ь е т е Луи Пауль (C a i l e t e t Louis Paul) (1832—1913) — французский физико-химик, известен изобретением аппаратуры для сжижения газов, занимался также вопросами воздухоплавания.

К а м е р л и н г - О н н е с Гейке (K a m e r l i n g h O n n e s Heike) (1853—1926) — голландский физик, лауреат Нобелевской премии, которая была присуждена ему за исследование свойств тел при низких температурах.

К а у ф м а н Вальтер (K a u f m a n n Walter) (1871—1947) — немецкий физик, исследовал движение заряжённых частиц в электрическом и магнитном полях, открыл зависимость массы электрона от скорости его движения.

К в и н к е Георг (Q u i n s k e George) (1834—1906) — немецкий физик, известен многочисленными экспериментальными работами по поглощению электромагнитных волн, фотографическому процессу, структуре твёрдых тел и др.

К е р р Джон (K e r r John) (1824—1907) — английский физик. В 1875 г. открыл действие электрического поля на оптические свойства вещества, исследовал электрооптические и магнетооптические свойства ряда веществ. Открыл явление вращения плоскости поляризации при отражении света от полированного конца магнита.

К и р х г о ф Густав Роберт (K i r h o f f Gustav Robert) (1824—1887) — немецкий физик. Совместно с Р. Бунзеном положил начало спектральному анализу (1859), установил принцип обращения спектральных линий, открывший широкие возможности для астрофизических исследований. В 1859 г. Кирхгоф сформулировал основной закон теплового излучения и поставил задачу о нахождении вида функции распределения энергии в спектре чёрного тела, решение которой привело М. П л а н к а к гипотезе квантов энергии.

Кирхгоф ввёл в физику понятия электрического потенциала и абсолютно чёрного тела, установил закономерности для электрического тока в разветвлённых цепях (правила Кирхгофа). Он — автор четырёхтомных «Лекций по математической физике», сыгравших существенную роль в развитии теоретической физики.

Клапейрон Бенуа Поль Эмиль (Clapierone Benua Pol Emile) (1799—1864) — французский физик. Дал уравнение состояния идеальных газов. Раскрыл существо термодинамических идей С. Карно (1835). При анализе работ Карно впервые применил графический метод изображения термодинамических процессов. Дал уравнение, устанавливающее зависимость точек плавления и кипения от давления (1834).

Клаузиус Рудольф (Clausius Rudolf) (1822—1888) — немецкий физик-теоретик. Совместно с В. Томсоном оформил термодинамику в научную систему. Он ввёл в науку одно из важнейших физических понятий — понятие энтропии. Клаузиусу принадлежит одна из первых формулировок второго закона термодинамики. Он дал теоретическое обоснование уравнения Клапейрона, определяющего изменение точки плавления (или кипения) с изменением давления.

Плодотворные работы Клаузиуса по кинетической теории газов были связаны с введением в физику статистических представлений. Ему принадлежат метод вириала, понятие длины свободного пробега молекул.

Совместно с итальянским физиком О. Моссотти разработал теорию поляризации диэлектриков, давшую соотношение между диэлектрической проницаемостью и плотностью диэлектрика.

Клеменчич Игнат (Klemenšic Ignat) (1853—1927) — чешский физик, известен экспериментальными исследованиями процесса затухания колебаний, разработал термоэлектрический метод детектирования электромагнитных колебаний.

Колли Роберт Андреевич (1845—1891) — русский физик, ученик А. Г. Столетова. Впервые обнаружил инертность ионов в электролитах, разработал теорию индукционной катушки, изобрёл первый осциллоскоп. Колли принадлежит идея опыта, который привел к установлению инертности электронов.

Кольрауш Фридрих Вильгельм Георг (Kolrausch Fridrich Wilhelm Georg) (1840—1910) — немецкий физик. Вместе с В. Вебером впервые измерил отношение электромагнитных и электростатических единиц, дал метод измерения электрических токов в абсолютных единицах, способ определения электрического сопротивления электролитов (мостик Кольрауша), изобрёл ряд физических приборов.

Кон Эмиль Георг (Con Emil Georg) (1854—1938) — немецкий физик, профессор Страсбургского университета, известен теоретическими работами по электродинамике движущихся систем, по максвелловской теории поля, металлооптике.

Корню Альфред (Cornu Alfred) (1841—1902) — французский физик, известен работами по оптике (спираль Корню, измерение скорости света).

Крукс Уильям (Crookes William) (1832—1919) — английский физик. В результате систематических исследований прохождения тока через разряжённые газы открыл радиометрические силы (1873) и построил прибор для измерения этих сил — радиометр. Открыл элемент таллий. Построил первый прибор для непосредственного наблюдения радиоактивных излучений с помощью спинтарископа. Дал ряд значительных работ по спектральному анализу и вопросам приложения физики и химии в промышленности и сельском хозяйстве.

Кундт Август (Kundt August) (1839—1894) — немецкий физик. Открыл метод измерения скорости звука в твёрдых телах и газах. Важные результаты получил при исследовании аномальной дисперсии света и преломления света в металлах. Кундту принадлежат многочисленные экспериментальные работы в области внутреннего трения и теплопроводности газов, пьезо- и пирозлектрических свойств кристаллов, двойного лучепреломления в жидкостях и др.

Кундт был организатором коллективного научного исследования. В руководимом им исследовательском институте учились выдающиеся русские физики П. Н. Лебедев, Б. Б. Голицын и др.

К ю р и Пьер (C u r i e P i e r r e) (1859—1906)— французский физик. Вместе со своей супругой Марией С к л о д о в с к о й получил выдающиеся результаты при исследовании явления радиоактивности, за что был удостоен Нобелевской премии. Ему принадлежат важные работы по магнетизму, пьезоэлектричеству и кристалло-физике.

К ю р и - С к л о д о в с к а я Мари (C u r i e - S k l o d o w s k a M a r i e) (1867 — 1934) — французский физико-химик, родилась в Польше. Совместно со своим супругом Кюри получила Нобелевскую премию за плодотворные исследования явления радиоактивности. Вторично была удостоена Нобелевской премии в 1911 г. за открытие радия и полония и исследования по химии радия.

Л а й м а н Теодор (L u t a n T h e o d o r e) (р. 1874)— американский физик, известен обширными исследованиями в области спектроскопии. Открыл в спектре атома водорода серию, названную его именем.

Л а н г л е й Самюэль (L a n g l e y S a m u e l) (1834 1906) — американский физик. Занимался изучением солнечной радиации, астрофизическими вопросами, а также проблемами воздухоплавания.

Л а р м о р Джозеф (L a r m o r J o s e f) (1857—1942) — английский физик. Важные результаты получил в области электронной теории. В физике широко известна теорема, названная его именем.

Л а ч и н о в Дмитрий Александрович (1842—1902) — русский электротехник, организатор физического отделения Русского физико-химического общества, электротехнического отдела Русского технического общества, один из первых пропагандистов и популяризаторов электричества. Сыграл важную роль в теоретической разработке проблемы передачи электрической энергии на большие расстояния.

Л е б е д е в Пётр Николаевич (1866—1912) — русский физик. Открыл и измерил давление света на твёрдые тела и газы. Установил закономерности взаимодействия волн и резонаторов различной природы. Его опыты обнаружили возможности общего подхода к изучению механических и электромагнитных волновых процессов. Открыл двойное лучепреломление электромагнитных волн.

Лебедев был выдающимся организатором коллективного научного исследования; он создал первую большую школу русских физиков.

Л е б е д и н с к и й Владимир Константинович (1868—1937) — русский физик, выдающийся педагог и популяризатор радиотехники, воспитатель кадров отечественных радиотехников.

Л е в е р ь е Урбан Жан Жозеф (L e v e r r y U r b a n J e a n J o s e f) (1811—1877) — французский астроном. Предсказал существование планеты Нептун и вычислил её положение. Открыл вековое движение перигелия орбиты Меркурия, которое нашло объяснение в теории относительности.

Л е н г м ю р Ирвинг (L a n g m u i r I r v i n g) (р. 1881) — американский физико-химик, лауреат премии Нобеля по химии. В физике известен работами по термоионной и электронной эмиссии, по высокому вакууму; изобрёл вакуумный насос, названный его именем.

Л е н а р д Филипп (L e n a r d P h i l i p p) (1862—1947) — немецкий физик, лауреат Нобелевской премии, которой был удостоен за работы по катодным лучам. Исследовал электризацию при падении воды, фотоэлектрический эффект, электрическую проводимость пламени, явление фосфоресценции.

Л е Ш а т е л ь е Анри (L e C h a t o l i e A n r y) (1850—1911)— французский физик, известен работами в области молекулярной физики.

Л е х е р Эрнст (L e c h e r E r n s t) (1856—1926) — немецкий физик, известен экспериментальными исследованиями эффектов Томсона и Пельтье и термоэлектри-

чества. Изобрёл известную установку для изучения стоячих электромагнитных волн (лехерова система).

Линде Карл Пауль (Linde Carl Paul) (1842—1934) — немецкий физик, известен работами в области техники низких температур, изобрёл холодильную машину, названную его именем.

Липпман Габриэль (Lippman Gabriel) (1845—1921) — французский физик, профессор общей физики Сорбоннского университета, известен работами по фотографическому процессу; он открыл способ цветной фотографии, получил фотографии стоячих световых волн. Ему принадлежат также работы по земному магнетизму, механике и общим вопросам физики.

Лодж Оливер (Lodge Oliver) (1851—1939) — английский физик. Исследовал электромагнитные волны вдоль проволок, разработал метод детектирования колебаний с помощью когерера, занимался изучением контактной разности потенциалов.

Центральное место в его исследовательской деятельности занимала проблема эфира, которой он посвятил ряд статей, монографий и популярных книг.

Лодыгин Александр Николаевич (1847—1923) — русский электротехник. Изобретатель лампы накаливания.

Лорентц Гендрик Антон (Lorentz Hendrik Antoon) (1853—1928) — голландский физик-теоретик, лауреат Нобелевской премии. Создатель классической электронной теории, сыгравшей огромную роль в построении физики микромира.

Одновременно с Л. Лоренцем (L. Lorentz) получил формулу, выражающую зависимость между показателем преломления и плотностью вещества (1880), дал теорию нормального эффекта Зеемана (1896), получил теоретически связь между коэффициентами теплопроводности и электропроводности проводников, установленную экспериментально Виденманом и Францем, развил электронную теорию дисперсии и поглощения излучения.

Лорентц построил электродинамику движущихся сред и дал преобразования пространственных координат и времени, названные его именем, которые легли в фундамент теории относительности. Он получил формулу, выражающую зависимость массы частиц от скорости их движения.

Лоренц Людвиг Валентин (Lorentz Ludwig Walentin) (1829—1891) — датский физик, известен как автор формулы, выведенной им независимо от Г. А. Лорентца (формула Лорентца-Лоренца) из электромагнитной теории света, построенной независимо от Максвелла.

Локьер Иозеф Норман (Lockyer Joseph Normann) (1836—1920) — английский астрофизик, известен работами, касающимися разнообразных астрофизических проблем, в особенности спектров звёзд.

Лощмидт Иозеф (Loschmidt Joseph) (1821—1895) — австрийский физик. Впервые определил число молекул в единице объёма газа при нормальных условиях (число Лощмидта). Известны его работы по кинетической теории, кристаллографии и стереохимии.

Лугинин Владимир Фёдорович (1834—1911) — русский физико-химик. Организовал первую в России термодимическую лабораторию. Автор ряда оригинальных работ в области термодимии.

Луммер Отто (Lumme Otto) (1860—1925) — немецкий физик. Важные результаты получил в области геометрической оптики. Совместно с Э. Герке создал многолучевой интерференционный прибор — так называемую пластину Луммера-Герке. Ему принадлежат тщательные измерения распределения энергии в спектре чёрного тела.

Ляпунов Александр Михайлович (1857—1918) — русский механик. Известен выдающимися работами в области теории равновесия и устойчивости, а также исследованиями в области математической физики.

Максвелл Джеймс Клерк (Maxwell James Clerk) (1831—1879) — английский физик. Основатель учения об электромагнитном поле. Автор основополагающих работ по кинетической теории газов, термодинамике, теоретической, небесной и прикладной механике.

Майкельсон Альберт Абрахам (Michelson Albert Abracham) (1852—1931) — американский физик, автор знаменитого опыта по обнаружению движения Земли относительно эфира, легшего в экспериментальный фундамент теории относительности. Майкельсону принадлежат изобретения интерферометра для сравнения длины метра с длиной световой волны, спектрального прибора высокой разрешающей силы (эшелон Майкельсона), звёздного интерферометра, усовершенствование методов измерения скорости света.

Маркони Гуглиельмо (Marconi Guglielmo) (1874—1937) — итальянский электротехник. Сыграл выдающуюся роль во внедрении радио в практику, за что был удостоен Нобелевской премии.

Маш Эрнст (Mach Ernst) (1826—1907) — австрийский физик и философ. Известен своими работами по истории и философии физики, в которых проводил субъективно идеалистическую точку зрения. Ему принадлежит несколько интересных исследований в области механики и акустики.

Менделеев Дмитрий Иванович (1834—1907) — русский учёный. Открыл периодический закон химических элементов, автор классических «Основ химии», один из организаторов Русского физико-химического общества. Открыл существование абсолютной температуры кипения, независимо от Клапейрона нашёл общее уравнение состояния газов. Менделеевым создана современная физическая теория весов, предложены точнейшие приёмы взвешивания. Ему принадлежит целый ряд плодотворных работ по развитию производительных сил России.

Мещерский Иван Всеволодович (1859—1935) — русский механик. Основатель механики тел переменной массы. Труды его явились базой для решения ряда проблем реактивной техники и небесной механики.

Милликэн Роберт Эндрюс (Millikan Robert Andrus) (1868—1953) — американский физик, лауреат премии Нобеля. Впервые произвёл опытное определение заряда электрона, дал наиболее точный метод измерения постоянной Планка. Милликэну принадлежит также ряд интересных работ по исследованию космического излучения и ядерной физике. Он автор ряда оригинальных учебных пособий по физике.

Минковский Герман (Minkowski Hermann) (1864—1909) — немецкий математик, сыграл большую роль в создании математической базы теории относительности.

Михельсон Владимир Александрович (1860—1927) — русский физик. Первый применил статистический метод к теоретическому объяснению спектра чёрного тела (1887). Заложил основы физики горения. В работе «О нормальной скорости воспламенения гремучих газовых смесей» (1890) установил зависимость движения фронта воспламенения от состава горючей газовой смеси.

Можайский Александр Фёдорович (1825—1890) — русский изобретатель, создатель первого в мире самолёта.

Морлей Эдвард Вильямс (Mogley Edward Williams) (1889—1923) — американский химик и физик. Ему принадлежат эксперименты по обнаружению фотоджержальд-лоренцовского сокращения, эксперименты и теория по обнаружению аберрации второго порядка.

Морозов Николай Александрович (1854—1946) — русский учёный. Предсказал существование инертных элементов, высказал ряд глубоких, оправдавшихся впоследствии предположений о структуре атома, возможности использования внутри атомной энергии, электронно-позитронной структуре вакуума, взаимной превращаемости атомов и др.

Моссотти Оттавиано Фабрицио (Mossotti Ottaviano Fabrizio) (1791—1868) — итальянский физик, известен как автор формулы, введенной им независимо от Клаузиуса (формула Клаузиуса-Моссотти).

Наежди́н Александр Иванович (1858—1886) — русский физик. Дал оригинальный способ определения критической температуры жидкостей в непрозрачных трубках.

Нейман Карл Готфрид (Neumann Karl Gotfrid) (1832—1925) — немецкий физик-теоретик, автор многочисленных работ по математической физике, относящихся к теории потенциалов, решению краевых задач и др.

Нейман Франц Эрнст (Neumann Franz Ernst) (1798—1895) — немецкий физик-теоретик. Дал первые варианты теории индукции и электродинамических взаимодействий на базе концепции дальнего действия. Ему принадлежат многочисленные теоретические работы по оптике упругого эфира (поляризация, двойное лучепреломление), магнетизму, теории упругости, теплопроводности и др. Ввёл в теорию электромагнетизма вектор-потенциал. Автор известных «Лекций по математической физике».

Нернст Вальтер Герман (Nernst Walter German) (1864—1941) — немецкий физико-химик. Установил тепловой закон, который называют третьим началом термодинамики. Дал теорию электролитического растворения металлов и электродных потенциалов. Нернст установил закон распределения растворяющегося вещества между двумя растворителями, обнаружил зависимость диссоциирующей способности растворителя от его диэлектрической постоянной, разработал диффузионную теорию кинетики гетерогенных реакций, идущих на границе фаз, изобрёл лампу накаливания, названную его именем.

Обербек Антон (Oberbeck Anton) (1846—1900) — немецкий физик. Занимался исследованиями электрических колебаний, проводимости гальванической поляризации. Ему принадлежит ряд лабораторных приборов, среди которых до сих пор широко известен маятник, названный его именем.

Оствальд Вильгельм Фридрих (Ostwald Wilhelm Fridrich) (1853—1932) — немецкий физико-химик. Установил связь электропроводности растворов кислот со степенью их электролитической диссоциации, дал способ определения основности кислот по величине электропроводности их растворов, открыл закон разбавления, связывающий степень диссоциации электролита с его концентрацией. Он автор ряда учебных пособий по физической химии.

Оствальд — основатель «Журнала физической химии», он положил начало изданию замечательной серии «Классики точных наук». С именем Оствальда связано реакционное течение теоретической мысли — энергетика.

Ольшевский Карол Станислав (Olszewski) (1846—1915) — польский физик. Известен работами по сжижению газов и изучению свойств вещества при низких температурах.

Пачинотти Антонио (Paciotti Antonio) (1841—1912) — итальянский физик, один из пионеров электротехники.

Пашен Фридрих (Paschen Friedrich) (1865—1941) — немецкий физик, известен обширными работами в области спектроскопии. Открыл в спектре водорода серию, названную его именем.

Перрен Жан Батист (Perrin Jean Batist) (1870—1943) — французский физик. Ему принадлежат классические работы по экспериментальному исследованию броуновского движения и определению числа Авогадро.

Петров Николай Петрович (1841—1912) — русский инженер, основатель гидродинамической теории смазки.

Петрушевский Фёдор Фомич (1828—1904) — русский физик, глава петербургских физиков, автор одного из выдающихся отечественных учебных пособий — «Курса наблюдательной физики», основатель физического отделения Русского физико-химического общества. Петрушевскому принадлежит ряд интересных экспериментальных исследований в области оптики и электромагнетизма.

Пикеринг Эдвард (Pickering Edward) (1846—1919) — американский астрофизик. Известен многочисленными работами в области звёздной спектроскопии.

Пикте Рауль (Pictet Raoul) (1846—1915) — французский физик, известен работами по сжижению газов.

Пирогов Николай Николаевич (1843—1891) — русский физик, автор выдающихся работ по кинетической теории газов.

Пито Альберт (Petot Ch. Albert) (1851—1923) — французский физик, известен работами по аэро- и газодинамике.

Планк Макс Карл Эрнст Людвиг (Planck Max Karl Ernst Ludwig) (1858—1947) — немецкий физик-теоретик. Создатель основ квантовой теории. В 1900 г. ввёл понятие о квантах, порвав с классическим представлением о непрерывности и лучения энергии, ввёл в физику одну из важнейших мировых постоянных — постоянную действия h , названную его именем.

Планку принадлежат также выдающиеся исследования в области термодинамики, относящиеся к обоснованию второго начала, применению термодинамики к решению ряда практических задач, теории слабых растворов и др.

Планку принадлежат многочисленные выступления по вопросам методологии физики. Он автор многотомного курса теоретической физики.

Планте Гастон Раймонд (Planté Gaston Reimonde) (1834—1889) — французский физик. В 1859 г. изобрёл аккумулятор.

Плато Жозеф Антуан Фердинанд (Plateau Joseph Antoine Ferdinand) (1801—1883) — профессор физики в Генте, автор ряда демонстрационных опытов.

Поггендорф Иоганн Христиан (Poggendorf Johann Christian) (1796—1877) — немецкий физик, известен как редактор журнала «Annalen der Chemie und Physik» (с 1824 г.), автор «Истории физики», издатель известного биографического словаря.

Пойнтинг Джон Генри (Poynting Jon Genri) (1852—1914) — английский физик. Сыграл важную роль в развитии теории электромагнитного поля. Он ввёл понятие о плотности потока энергии электромагнитного поля и сформулировал закон сохранения энергии для электромагнитных процессов, связанных с излучением.

Принсгейм Эрнст (Pringsheim Ernst) (1859—1917) — немецкий физик. Известен работами по температурному излучению и люминесценции.

Попов Александр Степанович (1859—1905) — русский физик. Ему человечество обязано открытием радио.

Пуанкаре Анри (Poincaré J. Henri) (1854—1912) — французский физик-теоретик, автор многочисленных работ по различным вопросам математической физики: теории потенциала, теории теплопроводности, теории электромагнитного поля, теории равновесия вращающихся жидких масс, небесной механики и др. Значительную роль сыграл Пуанкаре в основании теории относительности. Ему принадлежит известный труд «Электричество и оптика».

Рамзай Вильям (Ramsay William) (1852—1916) — английский физико-химик, удостоен Нобелевской премии за открытие нейтральных газов. Занимался исследованием критического состояния.

Резерфорд Эрнест (Rutherford Ernest) (1871—1937) — английский физик, основоположник ядерной физики. Открыл планетарное строение атома, возможность искусственного осуществления взаимного превращения элементов, уста-

новил состав радиоактивного излучения. Вместе с Содди разработал теорию радиоактивных превращений и сформулировал закон смещения при радиоактивном распаде, за что был удостоен Нобелевской премии.

Рейнольдс Осборн (Reynolds Osborn) (1842—1912) — английский физик и инженер. Положил начало разработке теории внутренних разрывов жидкости. Ему принадлежат плодотворные исследования сопротивления вязких жидкостей в трубах. Он ввёл фундаментальную для теории вязкой жидкости величину — число Рейнольдса.

Релей (Стрэтт) **Джон Вильям** (baron Rayleigh (Strutt) John William) (1842—1919) — английский физик, лауреат премии Нобеля за «работы по плотности газов и открытие в связи с этим аргона». После смерти Максвелла в 1879 г. возглавил кэвендишскую лабораторию. С 1885 г. секретарь Лондонского королевского общества, а с 1905 г. — его президент.

Релей работал в различных областях физики. В 1877 г. вышел его классический труд «Трактат о звуке». Особенно плодотворные результаты были получены Релеем в области теоретического исследования волновых движений вещества и эфира, а также в определении единиц измерения физических величин.

Рентген Вильгельм Конрад (Röntgen Wilhelm Konrad) (1845—1923) — немецкий физик. Открыл излучение, названное его именем, за что был удостоен премии Нобеля. Исследовал также поглощение инфракрасных лучей в воздухе, влияние давления на вязкость и коэффициент преломления жидкостей, явления пьезоэлектричества, пьезоэлектричества, оптические и электрические свойства кварца, магнитное вращение плоскости поляризации света и др.

Реньо Анри Виктор (Rengnault Anry Victor) (1810—1874) — французский физик, автор выдающихся экспериментальных работ по калориметрии и газовым законам. Ему принадлежат наиболее точные определения тепловых констант газов, паров и жидкостей, необходимых в расчётах тепловых двигателей.

Рузбум Гендрик Вильгельм (Rozeboom Hendric Wilhelm) (1854—1907) — голландский физико-химик, известен исследованиями сплавов.

Риги Август (Righi Augusto) (1850—1920) — итальянский физик, известен многочисленными работами в различных областях физики, особенно сочинениями, посвящёнными методологическим вопросам, и пионерскими исследованиями по радиотелеграфии, рентгеновским лучам и радиоактивности.

Рике Эдуард (Rieske Eduard) (1845—1915) — немецкий физик, занимался главным образом изучением газового разряда.

Розинг Борис Львович (1856—1916) — русский физик. Впервые выдвинул идею передачи изображений электрическим путём с помощью электронно-лучевой трубки.

Роуланд Генри Август (Rowland Henry August) (1848—1901) — американский физик. Исследовал магнитное поле конвекционных токов, усовершенствовал способ изготовления дифракционных решёток. Впервые произвёл наиболее точные абсолютные определения длин волн фраунгоферовых линий.

Рубенс Генрих (Rubens Heinrich) (1865—1922) — немецкий физик. Разработал так называемый метод остаточных лучей, который позволил получить монохроматическое излучение в инфракрасной части спектра. Дал точные измерения распределения энергии в спектре чёрного тела, исследовал отражение излучения от металлов.

Садовский Александр Иванович (1859—1920) — русский физик. Впервые теоретически показал, что электромагнитное поле обладает моментом количества движения.

Сименс Вернер (Siemens Werner) (1816—1892) — немецкий электротехник. Автор ряда крупных изобретений в области техники сильных токов.

Слаби Адольф (Slaby Adolf) (1849—1913) — немецкий электротехник. Ввёл ряд крупных усовершенствований в технику радиосвязи.

Славянов Николай Гаврилович (1854—1897) — русский изобретатель-электрик; первый предложил способ электрической сварки металлов.

Смолуховский Мариан (Smoluchowski Marian) (1872—1917) — польский физик, ему принадлежат обширные исследования в различных областях физики, особенную важность имеют его работы по кинетической теории газов, в частности по броуновскому движению.

Слугинов Николай Петрович (1854—1897) — русский физик, профессор Казанского университета. Исследовал явление свечения около электродов при электролизе; описал явление, которое легло в основу устройства прерывателя Веньельта.

Стефан Иозеф (Stefan Joseph) (1835—1893) — австрийский физик, установил эмпирически закон пропорциональности полного излучения чёрного тела четвёртой степени его температуры (1879). Занимался теорией газов (диффузия, теплопроводность, внутреннее трение), вопросами акустики, оптики кристаллов, теории электромагнитного поля, предложил метод измерения длины световых волн.

Стокс Джордж Габриэль (Stokes George Gabriel) (1819—1903) — английский физик-теоретик, секретарь, а затем президент Лондонского королевского общества (1854—1855). В области гидродинамики дал основное уравнение движения вязкой жидкости (уравнение Навье-Стокса), установил закон сопротивления жидкости движущемуся в ней шару (закон Стокса). В оптике ему принадлежат основополагающие работы по флуоресценции. Широко известна теорема Стокса в теории поля.

Столетов Александр Григорьевич (1839—1896) — русский физик, организатор первой отечественной школы физиков, первый представитель русской физики на международных съездах. Ему принадлежат первые систематические исследования фотоэлектрических явлений. Столетов открыл зависимость магнитной проницаемости от напряжённости поля, дал метод измерения магнитной проницаемости ферромагнетиков. Одним из первых обратил внимание физиков на плодотворность теории электромагнитного поля и много сделал для её утверждения. Большое значение для развития отечественной физики имели критические и популяризаторские работы Столетова.

Тамман Густав Генрих Иоганн Аполлон (Tammann Gustav Heinrich Johann Apollon) (1861—1938) — немецкий физик. Ему принадлежат многочисленные исследования в различных областях физики и химии, из которых широко известны работы по кристаллизации и плавлению, исследования свойств концентрированных растворов, работы по металлографии. Автор ряда фундаментальных монографий по вопросам жидкого и твёрдого состояния.

Терёшин Сергей Иванович (1863—1939) — профессор физики Военно-Медицинской академии, автор курса физики для медицинских институтов.

Тесла Николо (1857—1943) — сербский электротехник. Известен своими исследованиями токов высокого напряжения и высокой частоты. Ему принадлежит ряд изобретений в различных областях электротехники.

Томсон Вильям (лорд Кельвин) (Thompson William) (1824—1907) — английский физик. Совместно с Клаузиусом оформил термодинамику в научную систему. Ввёл абсолютную шкалу температур, открыл явление переноса тепла электрическим током. Совместно с Джоулем открыл явление охлаждения газа при адиабатическом расширении. Развивал теорию электрических колебаний, дал известную формулу периода колебательного контура.

В. Томсон изобрёл сифон-отметчик, квадратный и абсолютный электрометр, прибор для разложения периодических функций в ряд синусоидальных. Большое место в исследованиях В. Томсона занимали вопросы мировоззренческого характера. Он последовательно проводил идею о возможности свести все физические явления

к механическим движениям. Ему принадлежит ложная идея тепловой смерти вселенной. В. Томсон развил теорию атомов-вихрей, сыгравшей важную роль в истории электромагнетизма.

Томсон Джозеф Джон (Thompson Josef John) (1856—1940) — английский физик. Он открыл электрон. Исследованиями прохождения электричества через разряженные газы создал фундамент электронной теории. Разработал теорию движения заряженных частиц в электрическом и магнитном полях, которая, в частности, легла в основу устройства масспектрографа.

Томсон дал первую модель строения атома. В 1906 г. получил Нобелевскую премию по физике.

Тиндаль Джон (Tyndall John) (1820—1893) — английский физик. Известен исследованиями по звуку, рассеянию света (его имя носит эффект рассеяния света мутными средами), поглощению света газами и парами. Работал также в области биологии и геологии.

Уитстон Чарльз (Wheatstone Charles) (1802—1875) — английский физик. Дал мостовой метод измерения сопротивлений, названный его именем. Показал, что электрические искры между металлическими электродами дают спектр, характерный для вещества электродов. Уитстону принадлежит большое число различных изобретений в телеграфии, электронизмерительной аппаратуре и др.

Умов Николай Алексеевич (1846—1915) — русский физик. Основатель учения о движении энергии. Ввел в физику понятие плотности потока энергии. Сыграл выдающуюся роль в развитии отечественной физики.

Усагин Иван Филиппович (1857—1918) — русский физик, лаборант Московского университета, изобретатель трансформатора. Получил широкую известность постановкой лекционных демонстраций по университетскому курсу физики.

Фан-дер-Флит Пётр Петрович (1839—1904) — русский физик, один из первых помощников Ф. Ф. Петрушевского по организации практикума по физике для студентов. Занимался построением механической теории электрических явлений.

Феддерсен Беренд Вильгельм (Feddersen Berend Wilhelm) (1832—1918) — немецкий физик, впервые исследовал колебательный характер разряда конденсатора.

Фёдоров Евграф Степанович (1853—1919) — русский кристаллограф. Впервые предсказал существование 232 кристаллографических форм.

Феррарис Галилео (Ferraris Galileo) (1847—1897) — итальянский физик, известен исследованиями в области электротехники.

Физо Ипполит (Fizeau Ippolit) (1819—1896) — французский физик, автор известного метода измерения скорости света и ряда других оптических исследований. Ему принадлежат первые опыты по выяснению влияния движения среды на скорость света.

Фитцджеральд Георг (Fitzgerald George) (1851—1901) — английский физик. Ему принадлежат пионерские работы по максвелловской теории электромагнитного поля; вместе с Г. А. Лорентцом предложил гипотезу о сокращении тел в направлении их движения.

Флеминг Джон Амброс (Fleming John Ambrose) (1849—1937) — английский физик, один из пионеров радиотехники. Ему принадлежат обширные исследования в области радиотехники и телеграфии, фундаментальные руководства по этим дисциплинам. В физику вошло правило, названное его именем.

Фойгт Вольдемар (Voigt Woldemar) (1850—1919) — немецкий физик, автор многочисленных теоретических и экспериментальных работ в области кристаллооптики, электро- и магнитооптики, учебников, монографий и обзоров по различным разделам теоретической физики.

Фуко Леон (Foucault Leon) (1819—1868) — французский физик, автор знаменитого опыта, показывающего суточное вращение Земли; его имя носят открытые им вихревые токи, появляющиеся в сплошных массах проводников вследствие индукции. Фуко принадлежат многочисленные изобретения физических приборов.

Хвольсон Орест Данилович (1852—1934) — русский физик, выдающийся педагог и популяризатор. Автор многотомного «Курса физики», переведённого на многие европейские языки. Работы Хвольсона касались разнообразных вопросов физики: электромагнетизма, оптики, актинометрии, метрологии и др.

Хевисайд Оливер (Heaviside Oliver) (1864—1921) — английский физик, известен исследованиями в области радиофизики. Его именем назван слой ионосферы, играющий большое значение в распространении радиоволн.

Холл Эдвин Герберт (Hall Edwin Herbert) (1855—1938) — американский физик, открыл явление действия магнитного поля на электрический ток в металлах, названное его именем.

Христиансен Христиан (Christiansen Christian) (1843—1917) — датский физик, открыл явление аномальной дисперсии. В 1872 г. изобрёл водоструйный насос.

Циолковский Константин Эдуардович (1861—1928) — русский изобретатель, теоретик межпланетного воздухоплавания. Один из основоположников реактивной техники.

Чернов Дмитрий Константинович (1839—1921) — русский инженер, основатель металлографии и научного металловедения.

Чиколев Владимир Николаевич (1845—1898) — русский электротехник, один из основателей журнала «Электричество», сыграл важную роль в развитии отечественной военной электротехники.

Швейдлер Эгон (Schweidler Egon) (1873—1949) — немецкий физик, работал в области радиоактивности атмосферного электричества, электропроводности, ионизации газов.

Шиллер Николай Николаевич (1848—1910) — русский физик, дал первые экспериментальные подтверждения ряда выводов теории электромагнитного поля Максвелла; ему принадлежат интересные работы по аксиоматике термодинамики.

Штарк Иоган (Stark Iohann) (р. 1874 г.) — немецкий физик, открыл явление расщепления спектральных линий под действием электрического поля, обнаружил эффект Допплера на канальных лучах. Многочисленные работы провёл в области газового разряда.

Эвальд Петер Пауль (Ewald Peter Paul) (р. 1888) — немецкий физик, известен работами по рентгеноструктурному анализу.

Эдисон Томас Альва (Edison Thomas Alva) (1847—1931) — величайший американский изобретатель. Наиболее значительными его результатами были усовершенствование телеграфной связи и телеграфной аппаратуры, телефона, лампочки накаливания, изобретение фонографа, щелочного аккумулятора, способа электромагнитного выделения железа из руды и др. Он впервые наблюдал в лампочках накаливания явление, получившее название эффекта Эдисона.

Эйхенвальд Александр Александрович (1863—1944) — русский физик, впервые дал количественное экспериментальное подтверждение выводов классической электродинамики относительно токов смещения и конвекционных токов.

Экснер Феликс (Exner Felix) (1876—1949) — австрийский геофизик, известен обширными работами по динамической метеорологии.

Экснер Франц (E x p e r Franz) (1849—1926) — австрийский физик, известен работами по спектральному анализу и проводимости газов.

Эндрьюс Томас (A n d r e w s Thomas) (1813—1885) — ирландский физико-химик. Первый исследовал критическое состояние вещества, ввёл в физику понятие критической температуры и критического давления, дал ряд важных работ по сжижению газов.

Этвеш Лоранд (E ö t v ö s Lorand) (1848—1919) — венгерский физик, известен своими работами по исследованию гравитации.

Эттинггаузен Альберт (E t t i n g s h a u s e n Albert) (1850—1932) — немецкий физик, известен экспериментальными работами по эффекту Холла, магнитным и электрическим измерениям.

Яблочков Павел Николаевич (1847—1894) — русский электротехник. Изобретатель первого практически пригодного источника электрического освещения и ряда других электротехнических устройств.

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

Аббе 57, 58.	Бетти 182.	Вант-Гофф 117, 118, 119, 280, 298, 305, 306, 307.
Абрагам 261, 274, 349, 390.	Бецольд 218.	Варбург 121, 279, 291, 349, 397.
Авенариус 119, 320, 321, 452, 453, 454.	Биркеланд 280, 385.	Вебер 76, 90, 98, 139, 150, 159, 161, 178, 179, 180, 181, 182, 194, 213.
Авогадро 194.	Биш 350.	Вейнберг 101, 103, 278, 298, 457.
Адер 20.	Блати 38.	Вейс 277, 388.
Алексеев 306, 369.	Блерно 20.	Велферт 19.
Альберг 406.	Блондель 349.	Вестон 26, 122.
Амага 277, 298, 388.	Блондо 349.	Ветгэм 307, 308.
Амес 278, 281.	Блумбах 278.	Видеман 72, 76, 354, 361, 363.
Ангстрем 87, 389.	Бобылев 424, 425.	Виллари 356.
Аносов 53.	Богуский 439.	Вильд 428.
Апшель 388.	Бор 60, 340, 341.	Вильке 59.
Араго 390.	Больпман 56, 97, 99, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 111, 112, 113, 122, 123, 124, 127, 140, 147, 148, 178, 184, 189, 190, 191, 194, 226, 230, 251, 254, 255, 329, 338, 390, 400, 411, 422, 458.	Вильсинг 293.
Аркадьев 407.	Боргман 162, 235, 278, 426, 427, 428.	Вильсон 369.
Аронс 432.	Борщевский 24.	Вильсон 366, 367.
Аррениус 117, 118, 119, 122, 280, 306, 308, 333, 349, 389.	Боскович 92.	Вильхов 382.
Арсонваль 385.	Босша 280.	Вин В. 89, 97, 114, 279, 328, 332, 334, 338, 341, 391, 420.
Атвуд 64.	Боуда-Рошъ 15.	Вин М. 279, 404.
Аустенс 298, 303.	Бойль 69.	Винер 100, 121.
Бабине 65.	Бойс 87, 100, 278, 281, 292, 293.	Винклер 85, 86.
Бачинский 350, 411.	Брадлей 119.	Виоль 120, 277, 281, 380, 388.
Бальмер 120, 340.	Бранли 233, 277, 349.	Витковский 280.
Барели 290.	Браун 293, 349.	Витц 328.
Барклай 174.	Бриллум 298, 388.	Вихерт 360, 390.
Бартоли 254.	Брэгг 152, 433.	Вицентини 280.
Барю 381.	Буабодран 84, 85, 86.	Владимиров 45.
Баттели 298, 313.	Булгаков 235, 429, 430.	Вроблевский 113, 324, 325, 326.
Бауэр 62.	Бунзен 26, 27, 65, 66, 77, 80, 100, 339.	Воскресенский 438.
Бахметьев с. 400.	Буссинеск 388, 408.	Вуд 391.
Бекетов 444, 451, 452.	Бути 349.	Вульф 300, 302.
Беккерель 67, 72, 78, 186, 277, 350, 375, 376, 378, 379, 381, 388.	Бутлеров 394, 398.	Вышнеградский 70, 455.
Белл 122, 278, 390.	Бьеркнес В. 280, 294, 295, 296, 298, 335.	Гаген 326.
Беликов 407.	Бьеркнес К. 294, 389.	Гогенбах 385.
Бельштейн 398.	Вавилов 158, 341, 407.	Гадоллин 433.
Бемон 378, 379.	Ван-дер-Ваальс 102, 118, 119, 184, 280, 298, 305, 311, 389.	Галилей 81, 328.
Бенардос 43.	Ван-дер-Мансерадж 298.	Гальвакс 361.
Бернацкий 278, 389.		Гальске 24, 45, 47.
Бенуа 71, 277, 281, 283, 287, 290.		Гамбурцев 407.
Бернулли 126.		Гаммерль 280.
Бертло 119.		Гамильтон 102, 164, 166.
Бертран 179.		
Бессель 293.		
Бессемер 9.		

- Ганкель 182, 183.
 Ган 60.
 Гартман 47.
 Гаусс 75, 161, 181, 182, 184.
 Гаюн 194, 281.
 Гегель 97.
 Гезехус 278, 423, 425, 429, 430.
 Гейзенберг 111.
 Гейкок 303, 304.
 Гейнинг 50.
 Гельм 110, 112, 113, 134.
 Гельмгольц 39, 56, 58, 66, 78, 93, 95, 98, 100, 103, 110, 119, 121, 122, 123, 124, 125, 127, 137, 150, 178, 179, 181, 186, 187, 193, 209, 210, 212, 213, 214, 219, 220, 225, 266, 305, 351, 352, 385, 416, 427.
 Георгиевский 232, 235, 278, 430, 431, 432.
 Герц 100, 122, 140, 147, 153, 187, 213, 214, 215, 216, 217, 218, 220, 221, 222, 223, 224, 225, 227, 228, 229, 230, 232, 233, 264, 265, 267, 268, 272, 273, 274, 349, 351, 356, 361, 416.
 Гершель 53.
 Гершун 235, 278, 427, 429.
 Гесс 119.
 Гете 81.
 Гиббс 93, 94, 95, 96, 99, 107, 118, 119, 300, 302, 303, 304, 305, 391.
 Гильберт 390.
 Гильемиш 73.
 Гильом 45, 281, 283, 298, 386.
 Гимштедт 264.
 Гинтль 354.
 Гирмуцеску 349.
 Гитторф 352.
 Глаголева-Аркадьева 231.
 Глешер 18.
 Гладстон 174.
 Гоген 63, 64.
 Годкинс 56.
 Гокель 280.
 Голицын 90, 119, 227, 254, 255, 277, 298, 314, 317, 318, 319, 320, 321, 329, 330, 399, 400, 412, 435, 436.
 Гольдгаммер 193, 227, 240, 278, 457.
 Гольдштейн 354, 356.
 Гопкинсон 33, 121.
 Горсдорф 72.
 Грамм 29, 35, 37.
 Грене 26.
 Грец 279.
 Грибоедов 404.
 Гран 92, 93, 161.
 Гриффитс 281.
 Грот 433, 434.
 Гуи 348.
 Гюйгенс 120, 121.
 Гюттон 349.
 Данилов 457.
 Данилевский 18.
 Даниэль 26, 27, 71.
 Дарвин Д. 389.
 Дарвин Ч. 415.
 Дворжак 280.
 Дебьерн 378, 380, 383.
 Дейтон — Миллер 278, 391.
 Декарт 88, 146, 242, 415, 416, 417, 418.
 Деллинггаузен 296.
 Де-Метц 278, 454, 455, 458.
 Демокрит 184.
 Депре, Марсель 31, 32, 40.
 Дерн 38.
 Джинс 338.
 Джоуль 33, 53, 76, 110.
 Дидекинд 104.
 Дизель 16.
 Доливо-Добровольский 32, 36, 38, 39, 41, 42, 43, 45.
 Допплер 66, 120.
 Друде 279, 328.
 Дьюар, 56, 57, 118, 119, 278, 325, 326.
 Дюгем 93, 110, 119, 415.
 Дюпон-де-Лом 18.
 Дюфур 280, 385.
 Дэви 38.
 Егоров 235, 238, 278, 428, 429, 430, 431, 432.
 Ефимов 278.
 Жамен 68, 78, 313.
 Жансен 82, 388.
 Жанэ 277.
 Жерар 280, 326.
 Жиффар 18.
 Жоли 65, 294.
 Жордан 388.
 Жук 453.
 Жуковский 18, 19, 20, 21, 328, 401, 440, 455.
 Жюль Верн 17.
 Забудский 278.
 Зайончевский 453.
 Закржевский 280, 390.
 Зеeman 280, 369, 370, 389, 431, 432.
 Зельмейер 121, 266.
 Зилов 185, 192, 193, 194, 227, 272, 278, 427.
 Зернов с. 406.
 Златовратский с. 406.
 Зоммерфельд 328.
 Игнатовский 278, 429.
 Ильин 3.
 Имори 291.
 Иоффе 400.
 Казак 457.
 Кайзер 339, 340.
 Кальете 118, 119, 277, 322.
 Камерлинг-Оннес 325, 389.
 Кант 109.
 Кантор 104.
 Капцов 406.
 Каньяр-де-ла-Тур 310, 314.
 Кани 121.
 Каппенгагер 453.
 Капустин 278.
 Карвалло 328.
 Кастерин 401, 404, 406, 418, 419.
 Кауфман 274, 360, 361, 381, 390.
 Квинке 100.
 Кестерс 290.
 Кинг 24.
 Кирпичев 70.
 Кирхгоф 58, 71, 78, 80, 81, 89, 98, 100, 121, 154, 161, 178, 187, 188, 329, 339, 411, 415, 427.
 Кларк 26, 27, 122.
 Клапейрон 104.
 Клаузиус 78, 99, 108, 118, 119, 122, 179, 180, 182, 252, 313.
 Клейн 98, 390.
 Кленгиг 87, 230.
 Клифтон 278.
 Кнабс 19.
 Ковалевская 455.
 Колли А. Р. 405.
 Колли, Р. А. 213, 214, 217, 343, 350, 405, 427.
 Колоссовский 456.
 Кольрауш 72, 150, 159, 194, 279.
 Кон 226, 268.
 Коновалов 227, 306, 426.
 Коноя 432.
 Корн 295.
 Корню 277, 342.
 Корню 342.
 Корольков 278.
 Косогонов 454, 455.
 Костович 19.
 Котэ 182.
 Котов 19.
 Коттон 432.
 Коши 92, 104.
 Кравец 411.
 Кравков 407.
 Кравинский 445.
 Кребс 18.
 Кремье 264.
 Крова 385.
 Крукс 80, 257, 352, 353, 354, 381, 389, 448, 449.
 Крылов 90, 328.
 Кудр 214, 390.
 Кулон 76, 88, 161, 194, 273, 326.
 Куммер 47.

- Кундт 56, 58, 227, 228, 457.
 Куприянов 278.
 Купфер 62.
 Курльбаум 87, 337.
 Курнаков 432.
 Кэвендиш 56.
 Кюри Мари 277, 350, 375, 376, 377, 378, 379, 380, 381, 382, 383, 384, 388.
 Кюри Пьер 277, 300, 301, 302, 350, 352, 376, 378, 379, 380, 381, 382, 383, 384, 377.
 Лабард 382.
 Лаваль 13, 14.
 Лависс 387.
 Лагранж 166, 167, 172.
 Лазарев 400, 407.
 Ламберт 65.
 Ламейер 47.
 Лампе 290.
 Ландсберг 407.
 Ланг 286, 349.
 Ланген 15.
 Ланглей 87, 278, 331, 332.
 Ланжевэн 277, 300, 301, 388.
 Лаплас 90, 104, 105, 126.
 Лармор 278.
 Лачинов 30, 32, 276.
 Лауэ 112, 433.
 Лебелев 55, 58, 86, 87, 226, 227, 228, 229, 230, 231, 232, 252, 254, 255, 256, 257, 258, 259, 269, 274, 278, 295, 296, 328, 333, 341, 342, 365, 400, 401, 402, 403, 404, 405, 406, 407, 412, 413, 414, 423, 435, 458, 459.
 Лебединский 78, 235, 278, 429.
 Леверье 84, 102.
 Леви-Чивита 280, 289.
 Леги 295.
 Лейберг 404.
 Лейст 278, 401.
 Лекланше 26.
 Леман 279.
 Ленард 354, 365.
 Ленин 5, 7, 40, 43, 45, 49, 51, 52, 57, 58, 109, 111, 127, 176, 274, 275, 350, 392, 393, 412, 413, 446, 461.
 Ленуар 14.
 Ленц 22, 23, 33, 72, 73, 74, 75, 78, 188, 213, 423, 424, 436.
 Лермантов 232, 423, 424, 429.
 Лепинэ 277.
 Лесаж 296.
 Лехер 263, 390.
 Лиленталь 20, 23.
 Линде 118, 119.
 Липпман 121, 277, 300, 328, 388.
 Лобачевский 234.
 Лодж 218, 219, 233, 389.
 Лодыгин 18, 33, 34, 43, 57, 276, 278.
 Ломоносов 42, 88, 91, 92, 93, 100, 102, 146, 150, 175, 244, 245, 294, 311, 326.
 Лопатин 445.
 Лорберг 180, 181.
 Лорентц, Г. А. 120, 177, 185, 250, 251, 252, 253, 255, 265, 266, 267, 273, 274, 280, 298, 345, 350, 369, 370, 389, 430, 431.
 Лоренц, В. 177.
 Лоренцонн 82.
 Лошмидт 102, 107.
 Лугинин 55, 401.
 Лукреций 184.
 Лэпп 60.
 Любимов 395, 396, 397, 408, 419.
 Любославский 235.
 Люммер 279, 328, 334, 335, 337.
 Магнус 227, 452.
 Майер 109, 110.
 Майкельсон 83, 119, 120, 273, 287, 288, 290, 342, 344, 345, 346, 347, 369, 391.
 Макаров 438.
 Максвелл 3, 24, 56, 80, 81, 93, 98, 100, 103, 110, 116, 118, 119, 121, 122, 125, 127, 131, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 156, 155, 158, 159, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 177, 176, 178, 181, 182, 184, 185, 186, 189, 191, 194, 210, 213, 220, 221, 225, 226, 231, 239, 240, 241, 244, 245, 257, 262, 263, 273, 281, 282, 287, 296, 297, 303, 312.
 Максим 20.
 Маликов 369.
 Малюс 390.
 Мандельштам 90, 91, 176, 341, 348.
 Мариотт 63, 117.
 Марковников 420.
 Маркони 237.
 Маркс 5, 24, 109, 446, 461.
 Мартен 10.
 Масен 68.
 Массе-де-Лепинэ 277, 281.
 Маскар 78, 277, 388.
 Матиас 298, 316, 321.
 Матиссен 79.
 Мах 66, 89, 280.
 Мейдингер 26.
 Мейер 78, 85, 442.
 Менделеев 18, 62, 76, 77, 80, 81, 83, 84, 85, 86, 88, 119, 232, 286, 306, 307, 308, 310, 311, 313, 394, 398, 424, 425, 426, 436, 437, 438, 439, 440, 441, 442, 443, 444, 447, 458.
 Меншуткин 83.
 Меснажер 298.
 Мечников 59, 60.
 Мешерский 429.
 Мичель 328.
 Мизес 90.
 Милликэн 278, 369, 391.
 Минковский 164, 389.
 Миткевич 144, 235, 366, 432.
 Михельсон 227, 278, 330, 331, 332, 334, 339, 340, 385, 419, 420, 421, 422, 423.
 Можайский 18, 19, 20.
 Мор 104.
 Морган 34.
 Морзе 24, 235.
 Морлей 278, 346, 391.
 Морозов 444, 445, 446, 447, 448, 449, 450, 451, 452.
 Москотти 103, 122, 209, 252, 274, 297.
 Муассан 277.
 Навье 92, 326.
 Нагаока 349, 391, 432.
 Надеждин 118, 119, 314, 315, 317, 453.
 Натансон 280, 390.
 Невилл 303, 304.
 Нейман К. 428.
 Нейман Ф. 89, 98, 161, 178, 179, 181, 182, 184, 213, 273.
 Некрасов 412.
 Нервандер 73.
 Нернст 34, 253, 278, 390.
 Николаев 272.
 Нильсон 85, 86.
 Новак 390.
 Ньюкомб 119.
 Ньютон 53, 66, 81, 89, 120, 160, 164, 175, 182, 293, 326, 328, 415, 416.
 Окатов 70.
 Ольшевский 102, 119, 324, 325, 390.
 Ом 138.
 Осипов 278.
 Оствальд 109, 110, 111, 112, 411.
 Остроградский 161, 436, 455.
 Отто 15.
 Павлов 386.
 Павловский 433.
 Панченко 457.
 Паррот 100.
 Парсонс 14.
 Паульсен 385.

- Паччинотти 389.
 Пелла 281, 283, 388.
 Пенлеве 277.
 Пенцольдт 100.
 Перлаундер 280.
 Перо 277, 290, 347, 388.
 Перрен 277, 298, 305, 308, 354, 355, 388.
 Петров В. В. 24, 33, 34, 42, 428.
 Петров И. П. 42, 43, 327, 328.
 Петровский 429, 430.
 Петрушевский 60, 61, 62, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 78, 114, 115, 118, 232, 236, 423, 424, 425, 427.
 Планк 96, 97, 105, 106, 107, 118, 119, 123, 124, 279, 306, 309, 313, 328, 335, 336, 337, 338, 339, 346, 347.
 Планте 27.
 Поггендорф 71, 78, 109.
 Погорелко 455.
 Погсон 82.
 Попов 43, 231, 233, 234, 235, 238, 239, 278, 279, 349, 394, 425, 429, 432, 458.
 Потье 349, 388.
 Поуэлл 275.
 Пойнтинг 175, 186, 221, 261, 274, 293, 349, 361, 409, 422.
 Предводителей 407, 422.
 Принсгейм 279, 334, 335, 336.
 Пикар 388.
 Пикте 118, 119, 280, 322, 323, 325.
 Пильчиков 278, 383, 384, 456, 457.
 Пирогов 99, 452, 458.
 Пироцкий 29, 30, 32, 277.
 Пирсон 294, 389.
 Пуазейль 326.
 Пуанкаре 90, 96, 98, 105, 107, 148, 217, 218, 261, 274, 277, 281, 282, 283, 349, 352, 375, 388, 422, 456.
 Пуассон 76, 92, 104, 161, 189, 209.
 Пулуа 354.
 Пулье 72.
 Пфеффер 117, 307.
 Райт В. 20, 21, 22.
 Райт О. 20, 21, 22.
 Рамбо 387.
 Рамзай 82, 83, 85, 86, 98, 376, 389, 448, 449.
 Ранкин 110.
 Рауль 118, 305, 306.
 Рачинский 191.
 Ребиндер 407.
 Резерфорд 60, 186, 382, 384, 389, 449.
 Рей 111.
 Реймон 385.
 Рейнольд 100.
 Рейнольдс 327, 328, 389.
 Рейх 80, 81.
 Релей 78, 83, 90, 100, 332, 334, 335, 342, 343, 348, 389.
 Ремер 119.
 Ренар 18.
 Рентген 122, 186, 263, 264, 268, 272, 354, 370, 372, 373, 374, 375.
 Реньо 65.
 Ржевкин 407.
 Ридберг 280, 328, 339, 340, 341, 389.
 Ризанек 297.
 Рикке 179, 279, 390.
 Риккер 279.
 Риман 90, 181, 182.
 Рихард 352.
 Рихарц 279, 293.
 Рихтер 80, 81, 85.
 Рич 65, 280, 349, 389.
 Розенберг 180.
 Розинг 430, 432.
 Ронти 184.
 Романов 406.
 Романова 290.
 Ромерсгаузен 76.
 Роско 66.
 Роуланд 82, 86, 87, 263, 264, 268, 339, 391.
 Рубенс 87, 231, 279, 337.
 Рузбум 304.
 Румкорф 76.
 Рунге 346.
 Руссо 280.
 Рыбкин 233, 235, 236.
 Рыкачев 277, 398, 399, 435.
 Рю 100.
 Рюкер 100.
 Савельев 72.
 Садовский 235, 261, 262, 274, 457.
 Салтыков-Щедрин 45.
 Сантос-Дюмон 20, 22.
 Саньяк 378.
 Сарасен 385.
 Сван 34.
 Селла 280.
 Серрен 75.
 Сеченов 385, 394.
 Сименс В. 24, 29, 45, 47.
 Сименс Ф. 10.
 Симон 279, 390.
 Сире 290.
 Спринг 280, 298.
 Скобельцын 235, 432.
 Слаби 237.
 Слутинов 457, 458.
 Слудский 409.
 Смолуховский 280, 390, 458.
 Смирнов 235, 404, 429, 456.
 Содди 384, 385, 443.
 Соколов 278, 401, 413, 417, 418.
 Соломка 43.
 Срезневский 457.
 Станкевич 458.
 Стасов 393, 394.
 Стеклов 455.
 Стефан 101, 120, 329, 390.
 Стокс 128, 138, 146, 326, 327, 342, 354, 376, 389.
 Столетов 18, 55, 56, 58, 78, 79, 80, 81, 87, 111, 119, 187, 188, 189, 191, 225, 228, 229, 310, 313, 314, 315, 316, 317, 321, 326, 330, 331, 340, 362, 363, 364, 394, 395, 396, 397, 398, 399, 400, 401, 402, 403, 404, 405, 408, 409, 410, 411, 412, 420, 422, 423, 427, 454, 458.
 Стоней 351, 352.
 Страус 453.
 Строхаль 280, 390.
 Стюарт 170, 214.
 Тальбот 65.
 Тамман 304, 305, 457.
 Терешин 278, 432.
 Тесла 38, 39, 122, 237, 238, 278.
 Тимирязев А. К. 3, 57, 241, 260, 406.
 Тимирязев К. А. 59, 386, 394, 401, 405, 407, 413, 459.
 Толмен 170, 214.
 Томас 9, 11.
 Томсон В. (Кельвин) 53, 78, 88, 93, 100, 101, 102, 118, 119, 125, 127, 128, 133, 148, 161, 180, 185, 186, 240, 260, 278, 328, 389.
 Томсон Дж. Дж. 53, 57, 186, 241, 242, 243, 244, 245, 246, 247, 248, 249, 250, 261, 274, 279, 350, 355, 356, 357, 361, 365, 366, 367, 368, 369, 373, 376, 381, 416, 450.
 Томсон И. 38, 278.
 Томсон С. П., 272.
 Тоунсенд 367, 381.
 Траубе 307.
 Треска 285, 286.
 Троттер 34.
 Тэт 180, 389.
 Уатт 43.
 Уитстон 71, 73.
 Ульянин 227, 457.
 Умов 55, 60, 66, 96, 110, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 175, 221, 274, 400, 405, 408, 409, 410, 411, 412, 413, 414, 415, 416, 417, 422, 458.
 Усагин 36, 121, 278, 395, 419.

Фабри 277, 290, 347.
 Файль 388.
 Фан-дер-Флит 425, 426.
 Фарадей 24, 53, 73, 75, 88, 100, 125, 135, 136, 139, 143, 144, 148, 150, 151, 152, 154, 160, 161, 162, 163, 169, 170, 171, 175, 176, 181, 186, 213, 225, 239, 242, 244, 273, 321, 322, 325, 369.
 Феддерсен 215, 349.
 Федоров 432, 433, 434, 435, 458.
 Фелттен 45.
 Феппль 226.
 Ферель 385.
 Феррарис 38, 389.
 Фехнер 76.
 Физо 119, 150, 159, 268.
 Фитцджеральд 186, 361.
 Фишер 100.
 Флеминг 366, 389.
 Фогель 120.
 Фогт 279, 298.
 Фолькман 430.
 Фонтен 30, 32.
 Фор 27.
 Форбе 119, 342.
 Франк 90.
 Френель 67, 92, 120, 121, 267, 268, 347.
 Фуко 24, 34, 35, 64, 67, 75, 119.
 Фурье 88, 89.
 Хвольсон 66, 114, 235, 236, 276, 278, 350, 385, 426, 428.
 Хевисайд 186, 255, 274.
 Хетчинсон 264.
 Холл 252, 253.
 Хотинский 29.
 Христиансен 280, 349, 389.

Хэнок 385.
 Цейнер 70.
 Цейсс 57, 58.
 Цельнер 179, 257, 298.
 Цермелло 107, 390.
 Цингер 409.
 Циолковский 18, 19, 23.
 Циперновский 38, 390.
 Чаплыгин 328.
 Чебышев 232, 433, 455.
 Челлис 294.
 Чернинг 385.
 Чернов 10, 18, 298, 299, 300, 303, 304.
 Четли 21.
 Чиколев 26, 27, 28, 29, 34, 35, 43, 276, 277.
 Чичерин 444.
 Чугаев 309.
 Шанжи 26.
 Шапошников 262.
 Шапои 280, 281.
 Шателен 29, 232, 233, 235, 278, 432.
 Шварц 19.
 Шведов 278, 298, 409, 456.
 Шеэи 326.
 Шейнбейн 76.
 Шенфлис 435.
 Шиллер 96, 119, 185, 191, 192, 194, 213, 240, 272, 397, 454.
 Шиллинг 24, 42.
 Шмидт 376.
 Шотт 58.
 Шаповский 276.
 Шпренгель 75, 77.
 Штрассман 60.
 Шуккерт 47.

Шуман 120.
 Шустер 185, 186, 283, 340, 348, 357, 373, 389.
 Щегляев 227, 278, 404, 419, 420.
 Эберт 361.
 Эдер 121.
 Эдисон 28, 33, 34, 36, 45, 59, 366, 390, 461.
 Эдлунд 182, 183, 184.
 Эдсер 450.
 Эйлер 92, 126, 294.
 Эйнштейн 161, 298.
 Эйхенвальд 263, 264, 268, 269, 270, 271, 272, 273, 278, 349.
 Экспер 280, 385, 390.
 Энгельс 5, 24, 31, 32, 39, 84, 109, 146, 183, 184, 273, 274, 307, 439, 440, 446, 461.
 Эндрюс 310, 311, 314.
 Эрнфест 314, 343.
 Эрстед 24.
 Эпикур 184.
 Эпинус 298.
 Этвеш 78, 280, 281, 292, 293, 390.
 Эттинген 279.
 Эттингсгаузен 253.
 Юз 390.
 Юинг 389, 397.
 Юлиус 280.
 Юнг 81, 82, 119, 342.
 Юнгер 28.
 Яблочков 28, 29, 33, 34, 35, 36, 37, 42, 276.
 Якоби 24, 29, 42, 283.
 Янсен 311.
 Ярковский 294.

Предисловие	3
Глава I. Развитие техники в период начавшегося упадка капитализма (1870—1900)	5
Общие замечания (5). Металлургия и машиностроение (6). Авиация (17). Электротехника (23). Итоги (43)	
Глава II. Физика периода 1870—1900 гг.	53
Новые черты в развитии физики (53). Развитие лабораторий и институтов (53). Физика и производство (56). Курс экспериментальной физики 70-х годов (60). Вопрос об электрических единицах (78). Спектральный анализ. Открытие новых элементов (80). Два направления в теоретической физике (88). Математическая аналогия (89). Теория континуума и теория дискретных систем (90). Успехи термодинамики (93). Возникновение теоретической физики (96). Кинетическая теория материи (99). Определение молекулярных размеров (100). Статистика Больцмана (103). Энергетика и атомистика (103). Курс физики в начале XX века (114). Заключительные замечания (122)	
Глава III. Развитие электрофизики в последней трети XIX в. Теория Максвелла	125
Возвращение к идеям Фарадея (125). Теория вихревого движения (126). Дж. К. Максвелл (133). Первая работа Максвелла по теории электричества и магнетизма (134). О физических силовых линиях (139). Предсказание Фарадея (151). Динамическая теория поля (152). «Трактат по электричеству и магнетизму» (160). Характеристика метода и теории Максвелла (175)	
Глава IV. Развитие электрофизики в последней трети XIX в. Борьба за теорию электромагнитного поля	178
Идейный разброд в теории электричества (178). Развитие теории Максвелла до опытов Герца (174). Опыты Герца (203). П. Н. Лебедев (226). А. С. Попов и открытие радио (231). Механические свойства электромагнитного поля (240). Возникновение электронной теории (249). Световое давление (253). Электромагнитное количество движения; момент количества движения (259). Электродинамика движущихся сред (262). Итоги и перспективы (273)	
Глава V. Состояние физики в конце XIX в.	276
Общие замечания (276). Международный конгресс физиков в Париже (277). Общие вопросы физики (281). Гипотезы о природе тяготения (294). Моле-	

кулярная физика и гидродинамика (298). Возникновение гипотезы квантов (328). Скорость света (342). Электродинамика (349). Атомная физика (350). Открытие электрона (350). Объяснение явления Зеемана (369). Открытие рентгеновских лучей (370). Открытие радиоактивности (375). Космическая и биологическая физика (384). Картина развития физики в отдельных странах (387).

Глава VI. Физика в России в конце XIX века. 392'

Подъём русской науки в пореформенную эпоху (392). А. Г. Столетов (394). Деятельность П. Н. Лебедева в Московском университете (401). Н. А. Умов (408). А. П. Соколов (417). Другие физики Москвы (418). Ф. Ф. Петрушевский (423). Другие физики Петербурга (425). Е. С. Фёдоров (432). Б. Б. Голицын (435). Д. И. Менделеев (436). Предвидения Н. А. Морозова (444). Физики Киева (452). Русские механики (455). Физики Одессы (456). Физики Казани, Юрьева и Варшавы (457). Выводы (458)

З а к л ю ч е н и е 460'

П р и л о ж е н и е: Краткий биографический справочник 463
Именной указатель. 481'

Павел Степанович Кудрявцев
История физики, том II.

Редактор *В. М. Дуков*
Переплёт и титул худ. *С. М. Мельцера*
Худож. редактор *М. Л. Фрам*
Техн. редактор *Н. П. Цирульницкий*

* * *

Сдано в набор 15/XI 1955 г. Подписано
к печати 22/VI 1956 г. А-08518.70×108^{1/16}.
Печ. л. 30^{1/2} (41,79). Уч.-изд. л. 38,51.
Тираж 25 тыс. экз. Заказ 2336

* * *

Типография № 2 Управления культуры
Ленгорисполкома
Ленинград, Социалистическая, 14

Цена без переплёта 10 р. 40 к.,
переплёт. ледериновый — 2 руб.,
коленкорový — 1 р. 50 к.